

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA.**  
**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES SOLARES**  
**FOTOVOLTAICOS CON CAPACIDAD DE  $35 \frac{kW \cdot h}{mes}$  PARA TRASMITIR**  
**LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA AL COMPRESOR DE UNA**  
**BOMBA DE CALOR.**

**AUTORES:**  
**ALMEIDA VÁSQUEZ EDGAR GABRIEL**  
**PEÑAHERRERA JARRÍN XAVIER ALEJANDRO**


**TUTOR:**  
**WILLIAM GIOVANNY QUITIAQUEZ SARZOSA**

**Quito, noviembre del 2018**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Almeida Vásquez Edgar Gabriel con documento de identificación N° 172140895-1 y Peñaherrera Jarrín Xavier Alejandro con documento de identificación N° 172423736-5, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CON CAPACIDAD DE  $35 \frac{kW \cdot h}{mes}$  PARA TRASMITIR LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA AL COMPRESOR DE UNA BOMBA DE CALOR”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

  
Almeida Vásquez Edgar Gabriel

C.I.: 1721408951

  
Peñaherrera Jarrín Xavier Alejandro

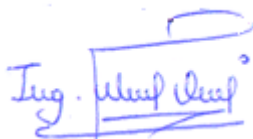
C.I.: 1724237365

Quito, noviembre del 2018

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CON CAPACIDAD DE  $35 \frac{kW \cdot h}{mes}$  PARA TRASMITIR LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA AL COMPRESOR DE UNA BOMBA DE CALOR”, realizado por Almeida Vásquez Edgar Gabriel y Peñaherrera Jarrín Xavier Alejandro, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerada como trabajo final de titulación.

Quito, noviembre del 2018



.....  
Quitiaquez Sarzosa William Giovanni

C.I.: 1721609764

## **DEDICATORIA**

A Dios, por haberme permitido llegar hasta estas instancias de mi carrera profesional y por haberme dado la salud para cumplir mis objetivos, además de su infinito amor.

A mi madre Tere, por darme la vida, apoyarme en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la exaltación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor incondicional.

A mi padre Edgar, por ser el ejemplo de perseverancia, sacrificio y constancia que lo caracterizan y que me ha inculcado siempre, por el valor mostrado para salir adelante en los momentos más difíciles y por su amor.

A mi hermana Anahí, por estar en los momentos más difíciles de mi vida y brindarme todo su apoyo.

Por último, pero no menos importante a mis familiares y amigos que participaron directa o indirectamente en mi carrera profesional.

**Gabriel**

Mi trabajo de investigación se la dedico en primer lugar a Dios, por darme la oportunidad de concluir con mi carrera universitaria.

A mis padres y a mi hermano, porque gracias a ellos con su apoyo, con sus consejos y con todo su tiempo que han invertido en mí para que pueda convertirme en una persona honrada con valores y cada día en una mejor persona.

A mi hermana María José y mi abuelo Pepito, que, aunque no se encuentren de manera física, siempre me queda el recuerdo que desde el cielo me cuidan, me protegen, me ayudan y me guían hacia un camino correcto para que todo salga bien en mi vida.

A mi novia, por sus palabras, por sus ánimos, por su confianza y por todo el tiempo que me ha brindado para que pueda seguir adelante en mi carrera y evitando que por obstáculos deje a medias mi trabajo.

Por último, pero no menos importante a toda mi familia, amigos y compañeros, que siempre serán un pilar fuerte y necesario en mi vida, porque sin ellos no podría ser la persona en la que soy ahora.

**Xavier**

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Politécnica Salesiana y cada uno de los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por habernos formado como buenos profesionales y honestos ciudadanos.

Al Ing. William Quitiaquez M.Sc., tutor del proyecto técnico, por confiar en nosotros para realizar el proyecto de investigación, además por sus aportes, tiempo y su paciencia, de igual manera a nuestros padres por su entrega, paciencia, amor, cariño y apoyo incondicional que nos han brindado cada día de nuestra mi vida, tanto en lo personal como en lo profesional.

Por último, pero no menos importante a nuestro amigo Pablo, que nos apoyó y brindó ideas para concluir con el trabajo de investigación.

**Gabriel - Xavier**

## CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	II
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XV
NOMENCLATURA .....	XVI
SUBÍNDICES Y SUPERÍNDICES .....	XVII
RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	1
PROBLEMA DE ESTUDIO .....	2
OBJETIVOS .....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPÍTULO I ANÁLISIS Y EJECUCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UNA BOMBA DE CALOR.....	4
1.1.    Revisión de la literatura.....	4
1.2.    Contaminación ambiental.....	6
1.3.    Consumo energético .....	6
1.4.    Energía solar.....	6
1.5.    Radiación.....	7
1.5.1.    Radiación directa.....	8
1.5.2.    Radiación difusa.....	9
1.5.3.    Radiación reflejada.....	9
1.5.4.    Irradiancia .....	10
1.5.5.    Irradiación .....	10
1.5.6.    Insolación .....	10
1.5.7.    Comportamiento de la insolación en Quito.....	11
1.6.    Energía solar térmica.....	13
1.7.    Energía solar fotovoltaica.....	14
1.8.    Sistema solar térmico .....	14
1.9.    Sistema solar fotovoltaico .....	15

1.9.1.	Tipos de paneles fotovoltaicos .....	17
1.10.	Aplicaciones generadas por la energía solar para paneles fotovoltaicos .	17
1.10.1.	Utilidad interactiva .....	18
1.10.2.	Sistemas autónomos .....	18
1.11.	Conceptos básicos sobre voltaje, intensidad de corriente y resistencia..	18
1.11.1.	Intensidad de corriente .....	20
1.11.2.	Resistencia eléctrica .....	20
1.11.3.	Voltaje .....	22
1.12.	Bombas de calor.....	22
1.13.	Clasificación de los refrigerantes.....	26
1.14.	Refrigerante 134a.....	27
1.15.	Refrigerante 12 .....	28
1.16.	Hidrocarburos .....	28
1.16.1.	Tipos de hidrocarburos .....	28
1.17.	Componentes de un sistema fotovoltaico .....	29
1.17.1.	Panel fotovoltaico.....	30
1.17.2.	Sistema de almacenamiento .....	32
1.17.3.	Regulador o controlador de carga .....	33
1.17.4.	Inversor.....	33
1.18.	Selección de alternativas.....	34
<b>CAPÍTULO II DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA UNA BOMBA DE CALOR.....</b>		<b>38</b>
2.1.	Bomba de calor.....	38
2.1.1.	Información técnica de la bomba de calor .....	39
2.2.	Característica de la implementación de un sistema fotovoltaico.....	41
2.3.	“Diseño A” dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	41
2.4.	Consumo medio diario crítico .....	42
2.5.	Cálculo del número de paneles fotovoltaicos.....	44
2.6.	Dimensionamiento de las baterías .....	47
2.7.	“Diseño B” dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	48
2.8.	Cálculo del número de paneles solares fotovoltaicos.....	49
2.9.	Dimensionamiento de las baterías .....	50
2.10.	Orientación e inclinación de los módulos.....	51

2.10.1.	Orientación del módulo fotovoltaico.....	51
2.11.	Inclinación .....	52
2.12.	Cálculo de potencia de las máquinas de laboratorio.....	53
2.12.1.	Análisis matemático del ciclo ideal de la bomba de calor.....	54
2.12.2.	Vapor saturado y sobrecalentado (Proceso 1-2).....	55
2.12.3.	Líquido saturado (Proceso 2-3) .....	57
2.12.4.	Calidad.....	58
2.12.5.	Transferencia de calor por unidad de masa de alta $[Q_H]$ .....	59
2.12.6.	Transferencia de calor por unidad de masa de baja $[Q_L]$ .....	59
2.12.7.	Trabajo neto consumido .....	59
2.12.8.	Coeficiente de desempeño de bomba de calor en un ciclo ideal .....	60
2.12.9.	Coeficiente de desempeño de refrigeración en un ciclo ideal .....	60
2.12.10.	Análisis matemático del ciclo real de la bomba de calor .....	60
2.12.11.	Vapor Saturado y Sobrecalentado (Proceso 1-2).....	61
2.12.12.	Líquido saturado .....	64
2.12.13.	Calidad.....	65
2.12.14.	Transferencia de calor por unidad de masa de alta $[Q_H]$ .....	66
2.12.15.	Transferencia de calor por unidad de masa de baja $[Q_L]$ .....	66
2.12.16.	Trabajo neto consumido .....	66
2.12.17.	Coeficiente de desempeño de la bomba de calor del ciclo real.....	67
2.12.18.	Coeficiente de desempeño de refrigeración del ciclo real.....	67
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS .....		69
3.1.	Instrumentos de control .....	69
3.2.	Ensayos.....	70
3.3.	Datos de la radiación .....	72
3.4.	Datos de la temperatura ambiente .....	73
3.5.	Datos de la velocidad del viento.....	75
3.6.	Datos de las pruebas realizadas a la bomba de calor.....	77
3.6.1.	Presión de entrada .....	77



3.6.2.	Presión de salida.....	78
3.6.3.	Temperatura de entrada al compresor .....	80
3.6.4.	Temperatura de salida del compresor .....	81
3.7.	Datos de la temperatura del agua.....	82
3.8.	Datos del rendimiento del compresor.....	84
3.9.	Análisis económico .....	88
3.9.1.	Lista de insumos y equipos .....	88
3.9.2.	Costo tarifario de la empresa eléctrica Quito.....	90
3.9.3.	Análisis comparativos de costos .....	93
3.9.4.	Estudio ambiental .....	94
3.9.5.	Costo de mantenimiento .....	95
3.9.6.	Análisis financiero del proyecto .....	95
3.9.7.	Ahorro económico .....	96
3.9.8.	Cálculo del valor actual neto (V.A.N) .....	96
3.9.9.	Cálculo de la tasa interna de retorno (T.I.R).....	97
3.9.10.	Recuperación de la inversión .....	98
CONCLUSIONES .....		99
REFERENCIAS.....		102
ANEXOS .....		112
MANTENIMIENTO BÁSICO .....		135

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Proporción de radiación dependiendo la región del espectro.....	8
<b>Tabla 1.2.</b> Radiación solar estimada de la ciudad de Quito .....	11
<b>Tabla 1.3.</b> Radiación solar estimada de la ciudad de Quito .....	12
<b>Tabla 1.4.</b> Tipos de paneles fotovoltaico.....	17
<b>Tabla 1.5.</b> Características de un panel fotovoltaico. ....	30
<b>Tabla 1.6.</b> Alternativas de paneles fotovoltaicos.....	35
<b>Tabla 1.7.</b> Alternativas de refrigerantes .....	36
<b>Tabla 2.1.</b> Parámetros empleados en la bomba de calor. ....	40
<b>Tabla 2.2.</b> Consumo de la bomba de calor .....	42
<b>Tabla 2.3.</b> Radiación solar en el Distrito Metropolitano de Quito. ....	44
<b>Tabla 2.4.</b> Tabla de inclinación en función de la latitud .....	52
<b>Tabla 2.5.</b> Nómina de las máquinas de laboratorio .....	53
<b>Tabla 3.1.</b> Nómina de instrumentos de medición.....	69
<b>Tabla 3.2.</b> Datos relevantes de las pruebas. ....	71
<b>Tabla 3.3.</b> Datos relevantes de la radiación solar.....	72
<b>Tabla 3.4.</b> Valores de la temperatura ambiente.....	74
<b>Tabla 3.5.</b> Valores de la velocidad del viento. ....	76
<b>Tabla 3.6.</b> Valor de la presión de entrada al compresor.....	78
<b>Tabla 3.7.</b> Valor de la presión de salida del compresor. ....	79
<b>Tabla 3.8.</b> Variación de la temperatura de entrada al compresor.....	80
<b>Tabla 3.9.</b> Variación de la temperatura de salida del compresor. ....	82
<b>Tabla 3.10.</b> Variación de la temperatura del agua en el condensador.....	83
<b>Tabla 3.11.</b> Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_{BC}$ ) del ciclo ideal .....	84
<b>Tabla 3.12.</b> Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_R$ ) del ciclo ideal.....	85
<b>Tabla 3.13.</b> Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_{BC}$ ) del ciclo real.....	86
<b>Tabla 3.14.</b> Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_R$ ) del ciclo real.....	87
<b>Tabla 3.15.</b> Costos de los equipos e insumos del sistema solar fotovoltaico.....	89
<b>Tabla 3.16.</b> Costos de los equipos e insumos de la bomba de calor.....	89
<b>Tabla 3.17.</b> Pliego tarifario vigente a enero del 2016 .....	90
<b>Tabla 3.18.</b> Planilla de consumo eléctrico mensual .....	91
<b>Tabla 3.19.</b> Equipos del laboratorio .....	92
<b>Tabla 3.20.</b> Análisis comparativo de costos .....	93
<b>Tabla 3.21.</b> Evolución de la inflación en el Ecuador .....	95

<b>Tabla 3.22.</b> Proyección de ahorro.....	96
<b>Tabla 3.23.</b> Cálculos de la T.I.R.....	97
<b>Tabla A 1.1.</b> Información del panel solar fotovoltaico. ....	112
<b>Tabla A 1.2.</b> Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°1. ....	113
<b>Tabla A 1.3.</b> Información del panel solar fotovoltaico. ....	114
<b>Tabla A 1.4.</b> Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°2. ....	115
<b>Tabla A 1.5.</b> Información del panel solar fotovoltaico. ....	115
<b>Tabla A 1.6.</b> Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°3. ....	117
<b>Tabla A 1.7.</b> Información del panel solar fotovoltaico. ....	117
<b>Tabla A 1.8.</b> Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°4. ....	118
<b>Tabla A 1.9.</b> Información del condensador. ....	119
<b>Tabla A 1.10.</b> Puntos específicos de la imagen térmica del condensador.....	120
<b>Tabla A 1.11.</b> Información del evaporador. ....	120
<b>Tabla A 1.12.</b> Puntos específicos de la imagen térmica del evaporador. ....	121
<b>Tabla A 1.13.</b> Información del compresor y tubería. ....	122
<b>Tabla A 1.14.</b> Puntos específicos de la imagen térmica del compresor y tubería. ...	123

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Longitudes de onda emitidas por el Sol .....	8
<b>Figura 1.2.</b> Disgregación de la radiación solar luego de pasar la atmósfera.....	8
<b>Figura 1.3.</b> Ángulos de inclinación del sol respecto a la tierra según los solsticios y equinoccios.....	10
<b>Figura 1.4.</b> Mapa de la insolación estimada de la provincia de Pichincha .....	11
<b>Figura 1.5.</b> Funcionamiento de un sistema solar térmico .....	15
<b>Figura 1.6.</b> Primer módulo solar .....	16
<b>Figura 1.7.</b> Efecto causado por la variación de la radiación solar en la curva característica de un sistema fotovoltaico.....	16
<b>Figura 1.8.</b> Esquemas de aplicaciones interactivas de utilidad. ....	18
<b>Figura 1.9.</b> Flujo de electrones en un material conductor.....	20
<b>Figura 1.10.</b> Código de colores de 4 bandas .....	21
<b>Figura 1.11.</b> Voltaje eléctrico.....	22
<b>Figura 1.12.</b> Ciclo de una bomba de calor .....	23
<b>Figura 1.13.</b> Esquema y diagrama T-s de un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor .....	24
<b>Figura 1.14.</b> Esquema y diagrama T-s para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor .....	25
<b>Figura 1.15.</b> Paneles fotovoltaicos .....	30
<b>Figura 1.16.</b> Módulo de silicio monocristalino .....	31
<b>Figura 1.17.</b> Módulo de silicio policristalino.....	31
<b>Figura 1.18.</b> Módulo de silicio amorfo .....	32
<b>Figura 1.19.</b> Batería para paneles fotovoltaicos .....	32
<b>Figura 1.20.</b> Conexión de un regulador de carga en un sistema fotovoltaico .....	33
<b>Figura 1.21.</b> Inversor de onda senoidal pura de 12V-6000W .....	34
<b>Figura 2.1.</b> Bomba de calor.....	38
<b>Figura 2.2.</b> Diagrama T-s para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor ..	39
<b>Figura 2.3.</b> Esquema de conexión de los paneles.....	47
<b>Figura 2.4.</b> Esquemas de conexión de baterías .....	48
<b>Figura 2.5.</b> Esquema de conexión de los paneles.....	50
<b>Figura 2.6.</b> Esquemas de conexión de baterías. ....	51
<b>Figura 2.7.</b> Inclinación. ....	52

<b>Figura 2.8.</b> Diagrama T–s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor .....	55
<b>Figura 2.9.</b> Diagrama T–s para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor .....	61
<b>Figura 3.1.</b> Variación de la radiación solar (26-abril-2018) .....	72
<b>Figura 3.2.</b> Temperatura ambiente .....	73
<b>Figura 3.3.</b> Velocidad del viento.....	76
<b>Figura 3.4.</b> Presión de entrada al compresor .....	77
<b>Figura 3.5.</b> Presión de salida del compresor .....	79
<b>Figura 3.6.</b> Temperatura de entrada al compresor. ....	80
<b>Figura 3.7.</b> Temperatura de salida del compresor .....	81
<b>Figura 3.8.</b> Temperatura del agua en el condensador. ....	83
<b>Figura 3.9.</b> Coeficiente de desempeño ( $COP_{BC}$ ) del ciclo ideal.....	84
<b>Figura 3.10.</b> Coeficiente de desempeño ( $COP_R$ ) del ciclo ideal .....	85
<b>Figura 3.11.</b> Coeficiente de desempeño ( $COP_{BC}$ ) del ciclo real .....	86
<b>Figura 3.12.</b> Coeficiente de desempeño ( $COP_R$ ) del ciclo real .....	87
<b>Figura A 1.1.</b> Panel solar fotovoltaico N°1. 112	
<b>Figura A 1.2.</b> Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°1. ....	113
<b>Figura A 1.3.</b> Imagen térmica del panel solar fotovoltaico N°1.....	113
<b>Figura A 1.4.</b> Panel solar fotovoltaico N°2.....	114
<b>Figura A 1.5.</b> Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°2. ....	114
<b>Figura A 1.6.</b> Imagen térmica del panel solar fotovoltaico N°2.....	115
<b>Figura A 1.7.</b> Panel solar fotovoltaico N°3.....	116
<b>Figura A 1.8.</b> Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°3. ....	116
<b>Figura A 1.9.</b> Imagen térmica del panel solar fotovoltaico N°3.....	116
<b>Figura A 1.10.</b> Panel solar fotovoltaico N°4.....	117
<b>Figura A 1.11.</b> Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°4. ....	118
<b>Figura A 1.12.</b> Imagen térmica del panel solar fotovoltaico N°4.....	118
<b>Figura A 1.13.</b> Condensador. ....	119
<b>Figura A 1.14.</b> Imagen térmica 3D del condensador. ....	119
<b>Figura A 1.15.</b> Imagen térmica del condensador. ....	120
<b>Figura A 1.16.</b> Imagen térmica 3D del evaporador.....	121
<b>Figura A 1.17.</b> Imagen térmica del evaporador. ....	121
<b>Figura A 1.18.</b> Compresor y tubería. ....	122

<b>Figura A 1.19.</b> Imagen térmica 3D del compresor y tubería. ....	122
<b>Figura A 1.20.</b> Imagen térmica del compresor y tubería. ....	122

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Imágenes termográficas .....	112
<b>Anexo 2.</b> Proceso de mejoramiento de la bomba de calor .....	124
<b>Anexo 3.</b> Planos de la bomba de calor .....	125
<b>Anexo 4.</b> Proceso de ensamble del sistema solar fotovoltaico .....	126
<b>Anexo 5.</b> Manual de operación .....	130
<b>Anexo 6.</b> Manual de mantenimiento .....	133

## NOMENCLATURA

PV	Panel fotovoltaico	$\eta_{inv}$	Rendimiento del inversor de un 90 %
CSP	Energía solar concentrada		
TES	Almacenamiento de energía térmica	$\eta_{bat}$	Rendimiento del inversor de un 95 %
$W \cdot m^{-2}$	Vatios por metro cuadrado	$\eta_{con}$	Rendimiento de conductor de un 100 %
$\left( \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día} \right)$	Vatios-hora por metro cuadrado-día	$Q_{Ah}$	Consumo de energía medio en $\left( \frac{A \cdot h}{día} \right)$
$Q$	Carga (Culombios)		
$t$	Tiempo (s)	$KT$	Pérdidas totales
$I$	Corriente (A)	$D_{aut}$	Días de autonomía
$R$	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )	$C_{max}$	Consumo máximo de la instalación
$V$	Voltaje (V)	$E_p$	Energía diaria que produce el panel
$GW_P$	Radiación $\left( \frac{W}{m^2} \right)$	$P_{MPP}$	Potencia pico del panel en condiciones estándar
$CC$	Corriente continúa	$HPS_{crit}$	Horas del sol pico del mes crítico
$P$	Potencia (W)	$PR$	Factor global de funcionamiento que oscila entre 0,65-0,9.
$V_{bat}$	Voltios de la batería (V)	$p$	Presión (kPa)
$N_T$	Número total de paneles	$T$	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
$N_{ser}$	Número de paneles conectados en serie	$h$	Entalpía $\left( \frac{kJ}{kg} \right)$
$C_{bat}$	Capacidad del campo de la batería	$h_{fg}$	Entalpía de evaporización $\left( \frac{kJ}{kg} \right)$
$P_{Dmax}$	Profundidad de descarga máxima		
$N_{par}$	Número de paneles conectados en paralelo	$s$	Entropía $\left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$
$L_{md}$	Consumo medio diario (bomba de calor) ( $W \cdot h$ )	$COP$	Coefficiente de operación
$L_{mdcrit}$	Consumo medio diario critico	$Q_H$	Transferencia de calor de alta $\left( \frac{kJ}{kg} \right)$
$W_{net}$	Trabajo neto $\left( \frac{kJ}{kg} \right)$		



## SUBINDICES Y SUPERINDICES

<i>T</i>	Total
<i>p</i>	Pico
<i>bat</i>	Batería
<i>ser</i>	Serie
<i>par</i>	Paralelo
<i>Dmax</i>	Descarga máxima
<i>md</i>	Medio diario
<i>mdcri</i>	Medio diario critico
<i>inv</i>	Inversor

$Q_L$	Transferencia de calor de baja $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$
<i>con</i>	Conductor
<i>Ah</i>	Amperio hora
<i>aut</i>	Autonomía
<i>max</i>	Máximo
<i>MPP</i>	Pico del panel
<i>fg</i>	Evaporización
<i>H</i>	Caliente
<i>L</i>	Frio
<i>net</i>	Neto

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CON CAPACIDAD DE  $35 \frac{kW \cdot h}{mes}$  PARA TRANSMITIR LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA AL COMPRESOR DE UNA BOMBA DE CALOR.**

Edgar Gabriel Almeida, Xavier Alejandro Peñaherrera Jarrín

Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa, M.Sc.

**RESUMEN**

El presente proyecto consiste en diseñar e implementar un sistema solar fotovoltaico que conste de cuatro paneles solares fotovoltaicos, un controlador de voltaje, un inversor de 1500 (W), un banco de 4 baterías de descarga profunda de 13,3 (V), para generar 1000 (W) como capacidad máxima en cualquier condición climática que se encuentre. Para la verificación del funcionamiento del sistema se conectó una bomba de calor, con un compresor de 1 HP. Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la bomba de calor fueron tabulados con datos experimentales tomados cada 2 minutos, estas pruebas tenían un tiempo aproximado de 20 min por cada proceso de calentamiento. La temperatura máxima alcanzada en el condensador por el agua fue de 50 °C, una calidad del 35,32 %, la transferencia de calor alcanzada en alta y baja fue 182,20 - 151,47 (kJ/kg) respectivamente, también se registró un trabajo neto consumido de 30,73 (kJ/kg) y un coeficiente de desempeño de 5,93. También se conectó varios equipos a la vez al sistema solar fotovoltaico para comprobar que pueden funcionar sin ningún problema. La implementación del sistema solar fotovoltaico tiene un costo inicial un poco alto, el cual puede ser recuperado, en un largo plazo; sin embargo, el sistema solar fotovoltaico tiene una vida útil de 25 años o más dependiendo el mantenimiento que se lo aplique, esta diseño e implementación, ayuda con el medio ambiente al dejar de utilizar combustibles fósiles para generar energía eléctrica, además el sistema puede dejar de emitir 66,4 kg de ( $CO_2$ ) al año. Como complemento para realizar esta investigación se utilizó una estación

meteorológica, la cual daba diferentes parámetros climáticos, como temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación incidente.

**Palabras claves:** Sistema solar fotovoltaico, capacidad máxima, temperatura máxima, vida útil, combustibles fósiles, condensador, energía eléctrica.

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SYSTEM OF SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS WITH A CAPACITY OF  $35 \frac{kW \cdot h}{mes}$  TO TRANSMIT THE ELECTRICAL ENERGY GENERATED TO THE COMPRESSOR OF A HEAT PUMP.**

Edgar Gabriel Almeida, Xavier Alejandro Peñaherrera Jarrín

Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa, M.Sc.

**ABSTRACT**

The present project consists of designing and implementing a photovoltaic solar system consisting of four photovoltaic solar panels, a voltage controller, an inverter of 1500 (W), a bank of 4 deep discharge batteries of 13,3 (V), to generate 1000 (W) as maximum capacity in any climatic condition that is. For the verification of the operation of the system, a heat pump was connected, with a 1 HP compressor. The results obtained from the tests performed on the heat pump were tabulated with experimental data taken every 2 minutes, these tests had an approximate time of 20 minutes for each heating process. The maximum temperature reached in the condenser by water was 50 ° C, a quality of 35,32 %, the transfer of heat reached in high and low was 182,20-151,47 (kJ/kg) respectively, there was also a network consumed of 30,73 (kJ/kg) and a performance coefficient of 5,93. It also connected several devices at the same time to the solar photovoltaic system to verify that they can work without any problem. The implementation of the solar photovoltaic system has a slightly high initial cost, which can be recovered, in a long term; However, the photovoltaic solar system has a useful life of 25 years or more, depending on the maintenance applied to it, this design and implementation, helps with the environment by not using fossil fuels to generate electric power, in addition the system can stop to emit 66,4 kg of per year. As a complement to this research, a meteorological station was used, which gave

different climatic parameters, such as ambient temperature, wind speed and incident radiation.

**Keywords:** Solar photovoltaic system, maximum capacity, maximum temperature, useful life, fossil fuels, condenser, electric power.

## INTRODUCCIÓN

La preocupación mundial por la conservación y protección del medio ambiente ha generado una concientización en la humanidad, la cual ha tratado de buscar nuevas formas de producir energía eléctrica, debido a las elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de los combustibles fósiles que son los principales generadores de energía eléctrica. Los progresos constantes y evolutivos de las tecnologías han logrado crear e implementar más sistemas renovables para generar toda la demanda que requiere la población mundial y de esta forma contribuir a la reducción de la destrucción del planeta.

La presente investigación se enfoca en la reducción de CO<sub>2</sub> mediante el diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico para el encendido de una bomba de calor. Esta se despliega con la búsqueda de información relacionada al tema a través de artículos científicos, libros y resultados experimentales a nivel mundial como local. El contenido es claro y conciso, porque se investigó sobre la historia de la energía solar fotovoltaica, componentes, funcionamiento y cálculo para el dimensionamiento del sistema. El cálculo del sistema solar fotovoltaico se lleva a cabo de acuerdo con la necesidad de corriente que requiere el compresor de la bomba de calor para su funcionamiento, una vez que se conozca la demanda se calcula la cantidad de paneles solares fotovoltaicos y baterías que se necesita para la generación y almacenamiento de energía, también se debe considerar los días de autonomía para la carga de las baterías sin importar en el mes que se ocupe.

Una vez puesto en funcionamiento el sistema solar fotovoltaico se realizará las pruebas pertinentes con la bomba de calor conectada al sistema para verificar que cumpla el ciclo de refrigeración con normalidad con lo hace cuando está conectada a la corriente eléctrica de línea, para comprobar el funcionamiento del diseño y de la bomba de calor se ocuparán equipos de medición como una estación meteorológica, sensores de temperaturas digitales y manómetros de presión, los cuales ayudan a obtener datos para el análisis correspondiente.

## PROBLEMA DE ESTUDIO

Actualmente, la constante emisión de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y gases tóxicos a la atmósfera que son producidos por la ignición de combustibles fósiles, los cuales son tratados para la producción y generación de energía eléctrica, producen enfermedades de tipo respiratorias y físicas como por ejemplo conjuntivitis, faringitis, insuficiencia cardíaca, deformaciones de neonatos, entre otras. Este problema puede ser atenuado mediante técnicas y sistemas partidarios con el medio ambiente.

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), existen muy pocas empresas que incentiven el uso de fuentes renovables de energía para el confort de las personas en sus hogares, trabajos u otras localidades. Las personas encuentran un ambiente de confort con una gran cantidad de energía eléctrica y equipos que armonicen la temperatura de su ambiente, lo que implica obtener una producción elevada de  $CO_2$ , que perjudica al medio ambiente y a la salud de las personas. Por eso se debe interactuar con las fuentes renovables de energía y equipos que puedan aprovechar todos estos recursos para disminuir la emisión de  $CO_2$  y el consumo eléctrico.

La presente investigación, pretende reducir la emisión de  $CO_2$  y la demanda eléctrica que presenta el sector residencial del DMQ, a través de la instalación de un sistema solar fotovoltaico y de una bomba de calor.

El Protocolo de Kioto tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 5,2 %, a partir de los niveles del año 1990, con estas medidas el protocolo justifica el objetivo de la investigación [1].

La bomba de calor es el único proceso conocido que puede circular la temperatura del medio ambiente y el calor residual de nuevo en un proceso de producción de calor. El encendido de este equipo se realizará mediante un sistema solar fotovoltaico, el cual usa una fuente renovable de energía, para la generación de electricidad, con esta adaptación se logrará que la bomba de calor permita la reducción de la energía primaria, los costos de funcionamiento y las emisiones de  $CO_2$ .

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un sistema de paneles solares fotovoltaicos con una capacidad de  $35 \frac{kW \cdot h}{mes}$  para transmitir la energía eléctrica generada al compresor de una bomba de calor.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar y recopilar la información obtenida en diferentes fuentes de consulta sobre la teoría y métodos de cálculo para sistemas que utilicen paneles solares fotovoltaicos autónomos.
- Diseñar un sistema fotovoltaico capaz de generar la cantidad de electricidad necesaria para el funcionamiento de un compresor utilizado en una bomba de calor.
- Determinar mediante pruebas experimentales, la capacidad de generación de los paneles solares fotovoltaicos y analizar la generación en función de las condiciones climáticas en diferentes días del año.
- Realizar una comparación en el ámbito ambiental y económico para determinar la factibilidad de implementar los paneles solares fotovoltaicos en el sistema de bomba de calor utilizada para el calentamiento de agua en el sector residencial.

# CAPÍTULO I

## ANÁLISIS Y EJECUCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA UNA BOMBA DE CALOR

En el capítulo a desarrollarse se explica todo lo relacionado con los conceptos fundamentales sobre la energía solar, irradiación, energía fotovoltaica y consumo energético, debido al uso de la energía solar, que es parte de las fuentes renovables que son capaces de reemplazar en última instancia el suministro energético mundial generado a partir de fuentes no renovables, estos conceptos van ligados con los requisitos que se necesitan para la implementación de un sistema de paneles fotovoltaicos, para el funcionamiento del compresor de una bomba de calor.

### 1.1. Revisión de la literatura

Según Hui et al. [2], una bomba de calor es un dispositivo que consta de un foco frío y un foco caliente, que genera transferencia de calor con una eficiencia elevada la cual es muy utilizada en varias aplicaciones, por ejemplo, la climatización de viviendas y edificios, producción de agua caliente sanitaria (ACS), entre otras. Esta puede ser optimizada al integrar un sistema térmico-fotovoltaico que ofrece generación de electricidad, servicios de agua precalentada y sobre todo brinda una reducción de carga energética usada en el aire acondicionado de un espacio físico [3, 4, 5].

La eficiencia anual del calentamiento de agua y generación de electricidad es aproximadamente entre 10 y 35 %, y al utilizar este dispositivo brindó un ahorro total energético de  $315 \frac{kW \cdot h}{año}$  por unidad de superficie del área. En base a la última década, toda la energía renovable ha encontrado su camino en lo que se tiene entendido como la cartera de generación eléctrica. Según Felten et al. [6], en Alemania, la generación neta de electricidad a partir de las fuentes renovables de energía eólica y solar han ascendido en aproximadamente a  $93 TW \cdot h$  en lo que va del 2014, esto representa el 14,9 % de la generación total de electricidad mundial. Gracias a estos favorables números la generación de energía no se ha convertido en solo un fenómeno, también está dejando sus huellas en Italia, Irlanda y España, que bien se sabe que estos países, tienen una gran capacidad comercial de mercado y un alto potencial de poder adquisitivo, es decir, con una gran cantidad de dinero para invertir en la generación de más energía eléctrica, a partir de la utilización de fuentes renovables de energía.



Según Araz et al. [7, 8], el consumo de energía de los edificios representa el 40 % del consumo total de energía en los Estados Unidos, mientras que los edificios también son responsables del 36 % de las emisiones de  $CO_2$ , debido a estos números se indica claramente la importancia que tiene el problema de la eficiencia energética dentro de los edificios, la investigación muestra que el proceso de eliminar el agua residual de edificios por medio de una bomba de calor, puede ser como una fuente de calor para el mismo mecanismo, esta bomba al ser diseñada junto al sistema fotovoltaico, es un COP de funcionamiento de 2,66; solo de la bomba, mientras que en todo el sistema el COP es de 1,96; estos números es lo que se ha conseguido al implementar un sistema fotovoltaico en su unidad de bomba de calor para el agua residual.

En Turquía según Bilir et al. [9, 10], las instalaciones fotovoltaicas van desde lugares comerciales hasta escuelas, como por ejemplo en la ciudad de Izmir, los paneles solares fotovoltaicos son instalados en el lado sur de los techos, para alternar con las bombas de calor en las diferentes estaciones del año, con la finalidad que este sistema cumpla con el trabajo de calentar y enfriar el aire acondicionado y además la generación de energía eléctrica para la escuela. A partir de este tipo de instalaciones la escuela se ha convertido en las nuevas y actualizadas “Green-house Structures (GHS)”, o edificaciones que reducen las emisiones de gas invernadero las mismas que sirven de ayuda al medio ambiente y al mundo [9, 11, 12].

Algo que es primordial en la implementación de sistemas autónomos fotovoltaicos, es la economía, cuanto es lo que se podría ahorrar o gastar en la instalación de este tipo de sistemas, según Tam et al. [13], las personas de la ciudad de Sydney, tienen un costo de ciclo de vida media, que es idóneo para utilizar un sistema solar fotovoltaico de 5 kW, este sistema es perfecto para una casa de 5 o más ocupantes que puede ahorrar un aproximado de USD 11,13 por persona, en un periodo de 25 años. Según Serrano et al [4, 14], un sistema solar fotovoltaico tiene una garantía de 25 años en cualquier parte del mundo.

Según Luján et al. [14], en el año 2012, existe una capacidad fotovoltaica energética global instalada de 100,5 GWp, donde, solo unos 70,5 GWp han sido instalados en Europa, existen varios estudios donde se indica que los sistemas fotovoltaicos pueden reducir drásticamente las emisiones de gas invernadero y de igual manera ahorrar

recursos de combustibles fósiles, además que se podrá eliminar en un 89 % de las emisiones al aire producidas por la generación de electricidad podrían evitarse si la electricidad de un panel fotovoltaico desplaza la electricidad de la red en el contexto de Europa y Estados Unidos.

### **1.2. Contaminación ambiental**

Según Ramos [15] la contaminación ambiental es universal y no intencional, que puede ir desde efectos fisiológicos imperceptibles como enfermedades, hasta la muerte. La prevención y el control integrado de la contaminación es un enfoque holístico destinado a prevenir o minimizar el riesgo de daño al medio ambiente en su conjunto.

### **1.3. Consumo energético**

El consumo energético depende del número de habitantes registrados en el Ecuador, esto quiere decir que está en función del aumento poblacional, en los últimos estudios se dedujo que aumentó en tres millones, lo que representa un incremento del 23,2 %; pasando de 13,2 millones de habitantes en 2005, a 16,3 millones en 2015 [16].

Otro indicador relevante se representa mediante el acceso y consumo de la energía moderna, en este caso, la electricidad. Es así como entre 2005 y 2015, el consumo eléctrico por persona se incrementó en 54 %, pasando de 933 a 1436 kW · h por habitante. Esto debe entenderse como un mejoramiento de las condiciones de vida de las personas, considerando un incremento del 90 % en el consumo eléctrico en ese periodo de tiempo [16].

### **1.4. Energía solar**

Según Nogueira et al. [17], la energía solar es conocida como una de las energías renovables o a su vez como una fuente limpia, que podría ayudar a resolver algunos de los conflictos más urgentes que afronta la humanidad; la fuente de energía que emite el sol se puede recolectar en el planeta de varias formas, este proceso de recolección de la energía solar, se ha utilizado siempre por la humanidad desde siglos pasados, por medio de distintas tecnologías que han ido transformándose [18], en el presente se puede almacenar radiación solar mediante mecanismos de captación de

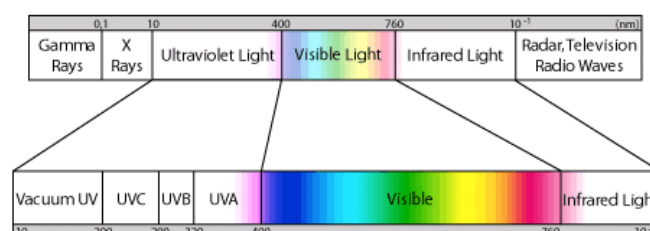
celdas fotovoltaicas, de helióstatos y colectores térmicos, teniendo como proceso la transformación en energía eléctrica o térmica [19].

Las distintas tecnologías que se aplican para los factores solares pueden ser clasificadas como pasivas o activas, esto va a depender de cómo capturar, convertir y distribuir la energía solar [18]. Pengfei et al. [20], estipula que las tecnologías activas solares térmicas se han convertido recientemente en un énfasis de investigación en el campo de la utilización solar en la construcción, debido al rápido desarrollo de productos de energía solar activa, utilizando paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos para recolectar energía. Entre las técnicas pasivas se encuentran diferentes técnicas en arquitectura bioclimática: Por otro lado, los módulos fotovoltaicos tienen varias características peculiares de integrarse con los edificios se convierten en una de las mejores opciones para utilizar la energía solar captándola y convirtiéndola en electricidad directa [20, 21].

### 1.5. Radiación

Es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas provenientes del sol que resulta de un proceso nuclear que tiene su origen en el sol, que llega a la superficie terrestre en una cantidad de 10000 veces mayor que la energía consumida actualmente por toda la humanidad, además esta energía es la impulsora que mueve todo el medio ambiente de la Tierra [22]. En realidad, según Zhang et al. [23], la radiación solar es transitoria en cualquier lugar, y se la denota las unidades de  $W \cdot m^{-2}$ , esta radiación cambia a lo largo del día, lo que atribuye principalmente al movimiento de la tierra y al caótico efecto de la atmósfera.

La radiación se despliega mediante ondas electromagnéticas que logran obtener distintas longitudes de onda, las cuales se conocen como espectro electromagnético; estas se vinculan con el resto de las ondas que son emitidas por el sol [22] y se las clasifica con el nombre de espectro solar como se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Longitudes de onda emitidas por el Sol [22].

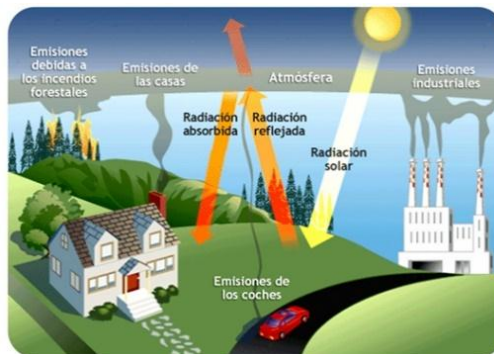
Para una mejor visualización de la radiación solar, se la puede categorizar por regiones de espectros mediante algunos porcentajes como se los puede apreciar en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Proporción de radiación dependiendo la región del espectro [22].

Región del espectro	Proporción de radiación (%)
Ultravioleta	7
Luz visible	43
Infrarrojo	49
Otros	1

La radiación solar se la puede expresar como la transferencia de energía por ondas electromagnéticas, que son producidas desde una fuente ilimitada la cual destina hacia todas las direcciones.

Según Yang [24], las ondas electromagnéticas pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la atmósfera de la Tierra la cual se encarga de descomponer en tres formas: radiación directa, difusa y reflejada o albedo, estos tipos de radiación se las puede visualizar mejor en la Figura 1.2.



**Figura 1.2.** Disgregación de la radiación solar luego de pasar la atmósfera [25].

Los tipos de radiación, se los puede captar de mejor manera a través de una explicación corta y detallada, que se lo va a llevar en los siguientes párrafos.

### 1.5.1. Radiación directa

Es aquella que proviene directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su trayectoria. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

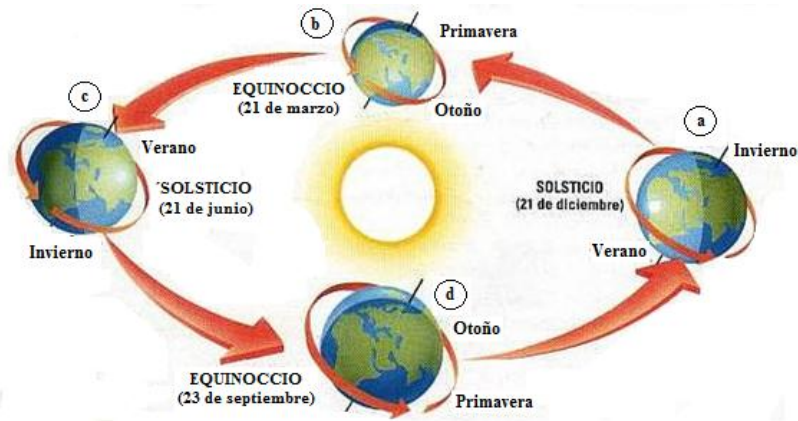
### **1.5.2. Radiación difusa**

La radiación difusa según Li et al. [26], es aquella que se recibe de la atmósfera en forma dispersa, debido a la radiación del sol. Esta energía puede proporcionar aproximadamente un 15 % de la radiación global en los días soleados, para esto se ha desarrollado modelos para estimar la radiación solar difusa por hora, y efectivizar los procesos que requieran de este tipo de radiación.

### **1.5.3. Radiación reflejada**

Según Feng et al. [27], la radiación reflejada es aquella que se irradia a través del área terrestre, y que necesita del factor de reflexión del área. Los problemas que se presentan en este tipo de radiación son en las áreas transversales, ya que por su ubicación no puede recibir ninguna radiación reflejada, pero mientras que las áreas verticales son las que más reciben.

El poder de esta radiación se basa en varios criterios tales como las condiciones climáticas, la difusión atmosférica, entre otros. El conocimiento de la radiación solar es esencial para calcular diferentes niveles de rendimiento relacionados con los sistemas de energía solar, tales como calentadores de agua solares, concentración solar, calefacción de casas y es esencial para el proyecto que se está desarrollando con sistemas fotovoltaicos [27]. Para realizar la instalación respectiva de los paneles fotovoltaicos se debe tomar en cuenta el ángulo de inclinación del sol respecto a la tierra, para esto se debe realizar un análisis de las épocas del año, como se puede visualizar en la Figura 1.3, la cual muestra los diferentes ángulos de inclinación según las épocas del año, esto servirá como referencia para la investigación.



**Figura 1.3.** Ángulos de inclinación del sol respecto a la tierra según los solsticios y equinoccios [28].

Cabe recalcar; que la inclinación del sol en la investigación no va a tener gran incidencia, debido a que hay el privilegio de estar ubicados en la línea ecuatorial, donde los rayos del sol caen perpendicularmente a la tierra, dando una ventaja sobre las demás ubicaciones [29].

Adicional el tipo de radiación que necesita los paneles solares fotovoltaicos para funcionar son la radiación directa y la difusa, e incluso logran generar energía eléctrica en condiciones de mucha nubosidad.

#### 1.5.4. Irradiancia

La irradiancia según Santbergen et al. [30], es la característica utilizada para representar la potencia incidente por unidad de área de todo tipo de radiación electromagnética  $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$ .

#### 1.5.5. Irradiación

Es la densidad de energía de radiación solar incidente en una superficie y se expresa en  $\left(\frac{W \cdot h}{m^2}\right)$  [31].

#### 1.5.6. Insolación

Según los estudios realizados por Raugai et al. [32], se ha determinado que la insolación es la suma de las irradiancias en el tiempo, ocasionando una acumulación de energía en un área determinada, durante un periodo de tiempo y es expresada en

$\left( \frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día} \right)$ , esta se utiliza generalmente para clasificar el potencial de la energía de un panel fotovoltaico.

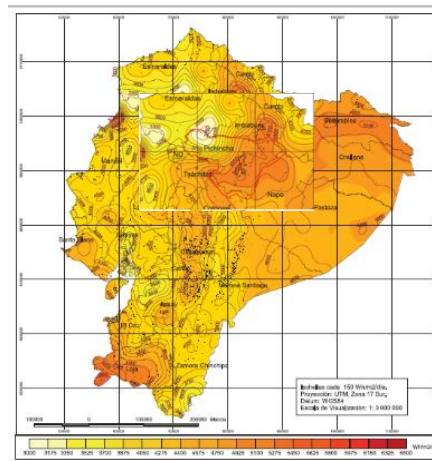
### 1.5.7. Comportamiento de la insolación en Quito

Para definir el comportamiento de la insolación promedio de la ciudad de Quito, se recomienda al menos 2 fuentes de consulta y con una recopilación de información de 4 años atrás:

- Atlas solar del Ecuador
- Software (Meteonorm 7)

#### 1.5.7.1. Atlas solar del Ecuador

Sirve para la verificación del comportamiento de la insolación promedio en todas las ciudades del Ecuador, mediante un rango variable, que es el cambio climático, por eso se debe realizar una recopilación de datos, al menos cuatro años atrás, de esta forma obtener datos reales promedios [33]. A continuación, se muestra en la Figura 1.4 un mapa de la insolación promedio de la provincia de Pichincha.



**Figura 1.4.** Mapa de la insolación estimada de la provincia de Pichincha [33].

En la Tabla 1.2 se refleja la radiación directa que incide en la ciudad de Quito, según los meses del año.

**Tabla 1.2.** Radiación solar estimada de la ciudad de Quito [33].

QUITO	
Mes	$\left[ \frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día} \right]$
Enero	4,95
Febrero	4,95
Marzo	4,65
Abril	4,80
Mayo	4,80
Junio	4,95
Julio	5,25
Agosto	5,55
Septiembre	5,98
Octubre	5,40
Noviembre	5,25
Diciembre	5,10

Como se puede evidenciar en la Tabla 1.2 los meses de marzo, abril y mayo, tiene una incidencia de radiación solar muy crítica. Debido a esta incidencia solar, se procede a realizar un promedio de la radiación solar con los tres meses más críticos que tiene el año; este promedio se basa en los valores que poseen dichos meses, dando un valor de

$$4,7 \left[ \frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día} \right].$$

#### 1.5.7.2. Software (Meteonorm7)

Este software, mitiga el esfuerzo que implica la comparación de información del atlas del Ecuador, mediante una base de datos a tiempo real. Esto quiere decir que los cálculos de la insolación promedio de la ciudad de Quito, van a tener una mayor exactitud como se muestra a continuación en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3.** Radiación solar estimada de la ciudad de Quito [34].



<b>QUITO</b>	
<b>Mes</b>	$\frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día}$
Enero	5,68
Febrero	5,57
Marzo	5,84
Abril	5,60
Mayo	5,10
Junio	5,37
Julio	5,58
Agosto	5,90
Septiembre	6,30
Octubre	5,77
Noviembre	5,53
Diciembre	5,45

En la Tabla 1.3 se refleja la radiación directa que incide en la ciudad de Quito, según los meses del año. Como se puede evidenciar en dicha tabla el mes de mayo, tiene una incidencia de radiación solar muy crítica.

### **1.6. Energía solar térmica**

La energía térmica, se la puede palpar especialmente en la energía solar concentrada (CSP), esta presenta ciertas características innatas tales como, una fuente de energía renovable que cada vez se hace más atractiva en los parámetros de investigación y su consumo [35]. La energía solar concentrada es un sistema que se utiliza para alcanzar el calor absorbido durante los períodos soleados y posteriormente liberarlo durante los períodos de baja o nula irradiación solar.

Según Gila et al. [36], existen actualmente a nivel mundial tres tipos de sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) disponibles: almacenamiento de calor sensible, almacenamiento de calor latente y almacenamiento de calor termoquímico. La tecnología, hoy en día, juega un papel muy importante en este tipo de energías renovables, debido a que se van realizando investigaciones y construcciones de nuevos instrumentos tecnológicos como son las plataformas de calefacción y refrigeración

renovables, o también renewable heating and cooling por sus siglas en inglés (RHC) [37], esta clase de tecnología se enfoca sobre la energía solar térmica que se encuentra entre la más opcionada y prometedora gracias a su accesibilidad disponible y a la madurez tecnológica alcanzada, lo que convierte en una alternativa válida, para la disminución de contaminantes, esto ayuda al medio ambiente no sólo para aplicaciones estándar como producción de agua caliente sanitaria, calefacción de espacios, entre otras, sino también para aplicaciones más avanzadas que son, calor industrial y refrigeración solar [35, 37].

### **1.7. Energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica (PV) es una industria creciente a nivel mundial y para mantener ese ritmo, los nuevos desarrollos han aumentado en cuanto al uso de materiales, consumo de energía para la fabricación de estos materiales, el diseño de dispositivos, producción de tecnologías, así como nuevos conceptos para mejorar la eficiencia global de las células fotovoltaicas [38, 39].

Según Alshayeb et al. [40], la energía solar es una fuente renovable prometedora de energía que ha captado una mayor atención pública en la última década. En 1999, la energía solar fotovoltaica (PV) instalada en todo el mundo alcanzó 1 GW y en 2013 superó los 138 GW de potencia instalada.

Los Estados Unidos desarrollaron una capacidad fotovoltaica de 54 % en 2010 mediante la instalación de cerca de 900 MW de nueva capacidad de generación de electricidad fotovoltaica para alcanzar una capacidad fotovoltaica acumulada de 2,5 GW [40], los dos primeros mercados en 2014 fueron China y Japón, con nuevas adiciones de 10,6 y 9,7 GW respectivamente añadidas a la capacidad total de la energía fotovoltaica [41].

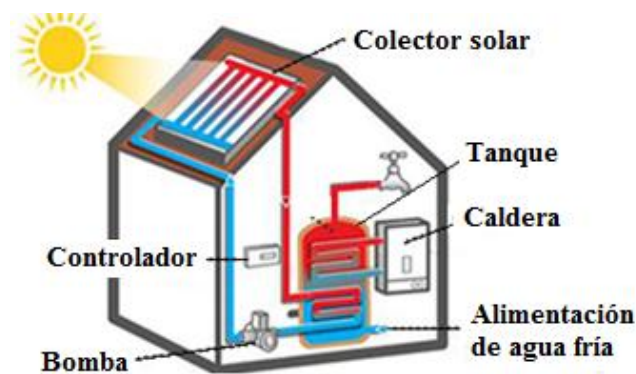
### **1.8. Sistema solar térmico**

La energía solar térmica es una forma importante de energía renovable, que puede ser aprovechada a través de diversas tecnologías para una amplia gama de aplicaciones.

Un acontecimiento histórico que surgió para la evolución de la energía solar térmica la priorizó el suizo Horace en 1767 cuando creó el primer sistema térmico, basado en una “caja caliente”. Para ello construyó una caja acristalada con el interior pintado de

color negro, que contaba con una capa de aislante que retenía el calor producido en su interior, el resultado de esta investigación fue que su caja caliente logró alcanzar temperaturas de hasta 109 °C y de ese modelo se basaron los actuales sistemas térmicos [42].

Winterscheid et al. [43], estipulan que la energía solar térmica se puede utilizar a través de tecnologías simples como la calefacción solar del agua, además se puede ocupar métodos prácticos que capten la energía solar concentrada (CSP) y desarrollar aire acondicionado solar. Según Bahraseman et al. [44], estos métodos son eficientes para el almacenamiento de energía solar térmica con diversas ganancias como alta eficiencia de conversión, asequibilidad y bajo costo.

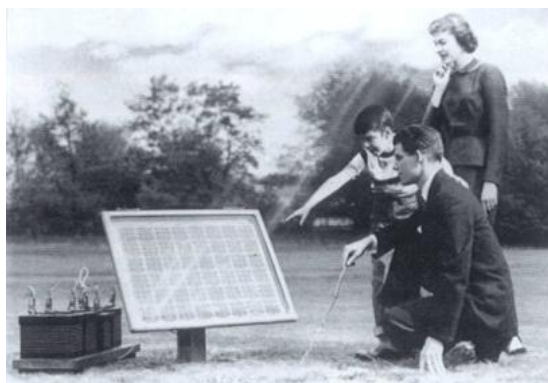


**Figura 1.5.** Funcionamiento de un sistema solar térmico [45].

### **1.9. Sistema solar fotovoltaico**

Fue reconocido por primera vez en 1839 por el físico francés Alexadre-Edmond Becquerel. Poco después, en 1883, el primer panel de células solares fue fabricado por el inventor norteamericano Charles Fritts. Recubrió el selenio con una capa de oro extremadamente delgada, por lo que fue transparente a la luz, y obtuvo una eficiencia de conversión de energía entre 1-2 %. Esta primera celda tuvo un alto costo, por eso se utilizó para otros usos diferentes a la generación de electricidad [46, 47].

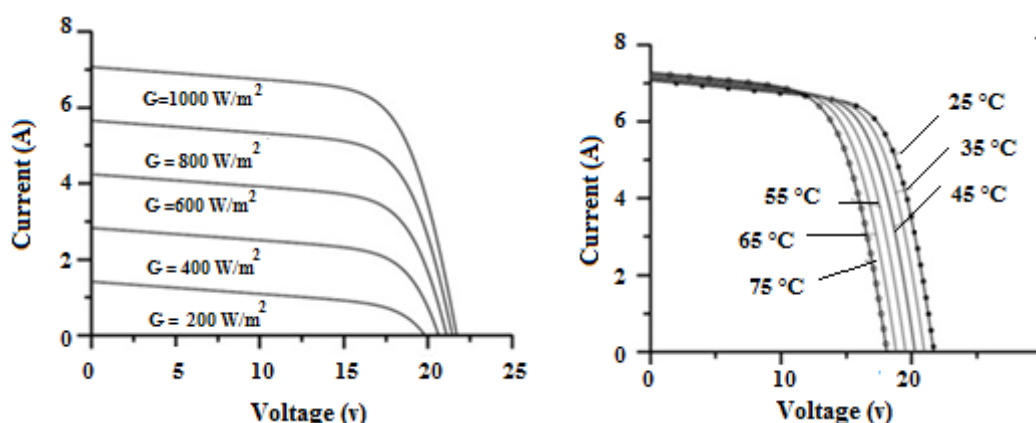
La primera célula solar hecha de silicio fue patentada en 1941 por Russel Ohl, y se tardó hasta 1954 que las células solares fueron mejoradas más allá del 1-2 % de eficiencia [48]. Este progreso sólo fue posible porque las personas involucradas tenían una buena comprensión de los procesos cuánticos mientras estaban desarrollando las técnicas de fabricación necesarias.



**Figura 1.6.** Primer módulo solar [49].

Hoy en día; para la generación de energía mediante el uso de radiación solar se puede emplear paneles solares fotovoltaicos, ya que es una de las fuentes de energía más abundante en el planeta, directamente en electricidad sin un motor térmico intermedio o equipo giratorio [19]. Los paneles fotovoltaicos se han utilizado convencionalmente para la generación de energía a menor escala, especialmente para uso comercial o residencial en complejos o edificios individuales. Estos paneles generalmente van desde el 12 – 18 % de eficiencia [50].

Los principales factores que afectan el rendimiento de un panel fotovoltaico son la intensidad de la radiación solar y la temperatura de la célula, como se muestra en la Figura 1.7 [17].



**Figura 1.7.** Efecto causado por la variación de la radiación solar en la curva característica de un sistema fotovoltaico [17].

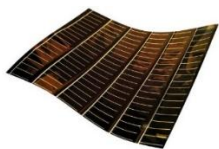

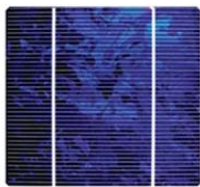
El equipo fotovoltaico no tiene partes móviles y como resultado, requiere un mantenimiento mínimo y tiene una larga vida útil de 25 años según Serrano et al [14]. Genera electricidad sin producir emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) o

cualquier otro gas y su funcionamiento es virtualmente silencioso [46]. El silicio es el material más común utilizado en la fabricación de células solares, debido a su abundancia en la tierra, baja tasa de contaminación y alta durabilidad. Las células de silicio más utilizadas son mono cristalinas y policristalinas [17]. Los sistemas fotovoltaicos pueden ser construidos prácticamente de cualquier tamaño, que van desde mili watt ( $mW$ ) a mega watt ( $MW$ ), y los sistemas son modulares, es decir, más paneles se pueden agregar fácilmente para aumentar la producción [48].

### 1.9.1. Tipos de paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos más conocidos en el mercado son de tres tipos: Thin film, monocristalinos y policristalinos. A continuación, en la Tabla 1.4 se mostrará cada panel con su respectiva descripción.

**Tabla 1.4.** Tipos de paneles fotovoltaico [51].

Paneles	Grafico	Eficiencia	Descripción	Vida útil
Thin Film		6-14%	Menor costo por Wp	10 - 17 años de vida [51, 52, 53].
Mono cristalino.		15-23 %	Mayor costo de Wp	25-35 años de vida [54, 55, 56]
Poli cristalino.		15-18 %	Menor costo por Wp	23-27 años de vida [54, 57]

### 1.10. Aplicaciones generadas por la energía solar para paneles fotovoltaicos

La energía solar es una de las fuentes inagotables de energía renovable y sobre todo tiene el potencial para reemplazar totalmente los combustibles fósiles. Los sistemas

fotovoltaicos se pueden acoplar en varias aplicaciones. Estas aplicaciones se pueden agrupar en dos categorías: Utilidad interactiva y sistemas autónomos.

### 1.10.1. Utilidad interactiva

Es aquella que utiliza los sistemas fotovoltaicos, para conectar a los inversores que convierten la corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). Esta electricidad puede encender los electrodomésticos o puede ser vendida directamente a la red. Estos sistemas se utilizan más comúnmente en casas o edificios comerciales [58].

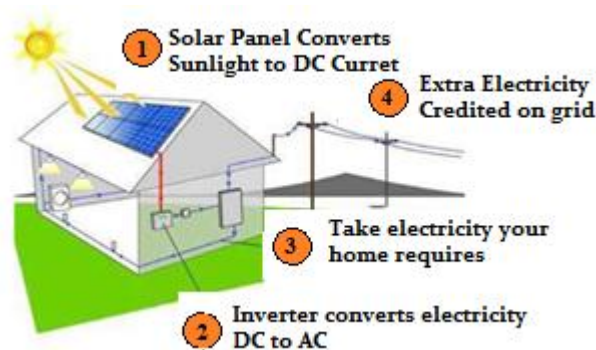


Figura 1.8. Esquemas de aplicaciones interactivas de utilidad [59].

### 1.10.2. Sistemas autónomos

Utilizan directamente la electricidad generada de la producción de los paneles fotovoltaicos. Cuando se requiere utilizar durante la noche o poca luz, se utiliza un método de almacenamiento con baterías. En ocasiones, el sistema autónomo utiliza generadores como una fuente de auxilio. Existe un sinnúmero de aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos autónomos, de los cuales se enlistarán a continuación [60].

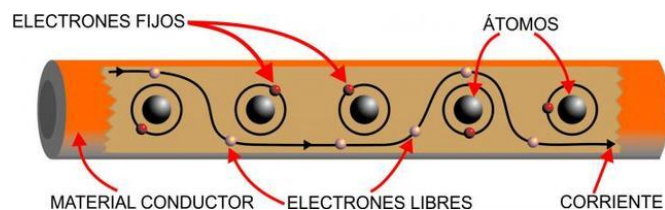
- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| • Iluminación                     | • Baterías de vehículos de carga          |
| • Comunicaciones                  | • Protección catódica de la energía solar |
| • Electricidad para zonas remotas | • Refrigeración                           |
| • Experimentos científicos        | • Productos de consumo                    |
| • Sistemas de alarma              | • Servicios públicos                      |
| • Bombeo de agua                  |   |

## 1.11. Conceptos básicos sobre voltaje, intensidad de corriente y resistencia

### 1.11.1. Intensidad de corriente

Es el flujo continuo de un conjunto de electrones dentro de un material conductor [61, 62], para que se produzca este movimiento libre de electrones debe ser primordial que los dos extremos del material conductor tengan una diferencia de potencial eléctrico, es decir, que un punto debe tener un potencial alto para que viaje hacia un punto con un potencial bajo [63].

Al poner a un material conductor como el cobre, se obtiene una cantidad considerable de electrones libres, estos se mueven de manera aleatoria dentro del material pero su desplazamiento neto es cero para cualquier dirección [63], se coloca como ejemplo a una batería, como se muestra en la Figura 1.9, cada electrón es atraído hacia un polo positivo y arrojado a un polo negativo, esto provocará que el proceso vaya desde el material conductor hasta una salida y de nuevo a la batería, todo esto es el flujo de electrones [62].



**Figura 1.9.** Flujo de electrones en un material conductor [63].

Toda la cantidad de electrones o la carga que viaja a través de un material conductor en el intervalo de un segundo en toda una sección transversal se llama Culombio, y la unidad con la cual se mide la intensidad de corriente es el amperio (A), que es lo mismo que decir un Culombio sobre segundo. La corriente viene expresada de la siguiente manera:

$$I = \frac{Q}{t} \text{ [A]} \quad (1)$$

Donde:

$Q$  = Carga (Culombios)

$t$  = Tiempo (Segundos)

$I$  = Corriente (Amperios)

### 1.11.2. Resistencia eléctrica

La resistencia viene definida por ser la mayor o menor oposición que se presenta en los cuerpos al paso continuo de la corriente eléctrica [61, 64], de igual manera se la puede definir como la fricción mecánica que existe entre un cuerpo y otro si se habla de la física mecánica. La unidad de medida dentro del Sistema Internacional de Unidades (S.I.) es el ohmio ( $\Omega$ ), así mismo para poder medir la resistencia en la práctica es necesario la utilización de un ohmímetro [61, 64, 65].

Su forma de expresión es la siguiente:

$$R = \frac{V}{I} [\Omega] \quad (2)$$

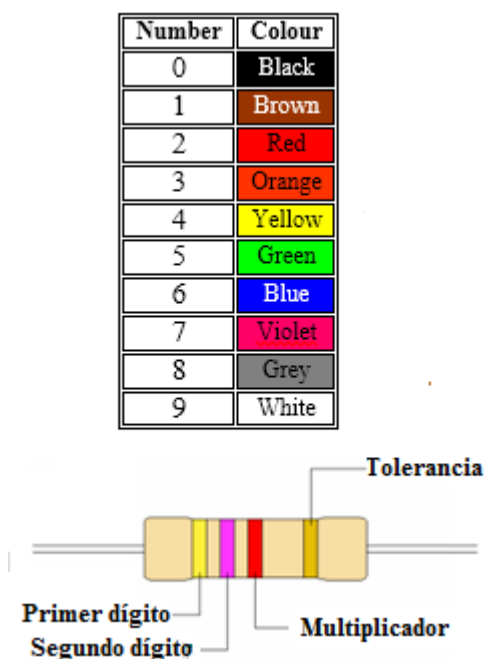
Donde:

$R$  = Resistencia eléctrica (Ohmios)

$V$  = Voltaje (Voltios)

$I$  = Corriente (Amperios)

Existe una forma de reconocer el valor que tiene una resistencia que se llama el código de colores [66], cada uno de los colores que constan en una banda, representa un número de acuerdo a la Figura 1.10.



**Figura 1.10.** Código de colores de 4 bandas [66].

En el sistema de tres o cuatro bandas, tal como se muestra en la Figura 1.10, el color de la primera banda representa el primer número, el segundo color viene dado por el



siguiente número, el tercer color es el número de ceros o multiplicador y por último, la cuarta línea de color es la tolerancia o precisión [65, 67].

La tolerancia, significa que el valor real no será necesariamente igual al que indica el código, se presenta un 10 % de tolerancia una resistencia, esto quiere decir que el valor puede ser en un diez por ciento mayor o menor de lo que indica el código de colores [65].

### 1.11.3. Voltaje

Es la diferencia del potencial que indica el nivel de energía de un circuito [61], y la diferencia del nivel de carga que existe entre los extremos de un material conductor [62]. Se lo representa por la letra (V) y su unidad de medida es el voltio. Su fórmula se la expresa de la siguiente manera:

$$V = I R \text{ [V]} \quad (3)$$

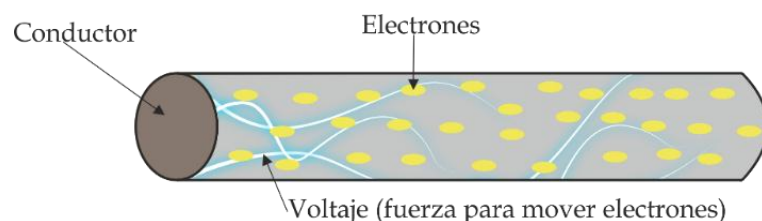
Donde:

$V$  = Voltaje (Voltios)

$I$  = Corriente (Amperios)

$R$  = Resistencia (Ohmios)

En Figura 1.11, se observa el funcionamiento de una pila, donde en sus polos existe una diferencia de potencial eléctrico que permite conectarlos con un material conductor, de esta manera los electrones viajarán desde un polo positivo (de mayor potencial) al polo negativo (de menor potencial).

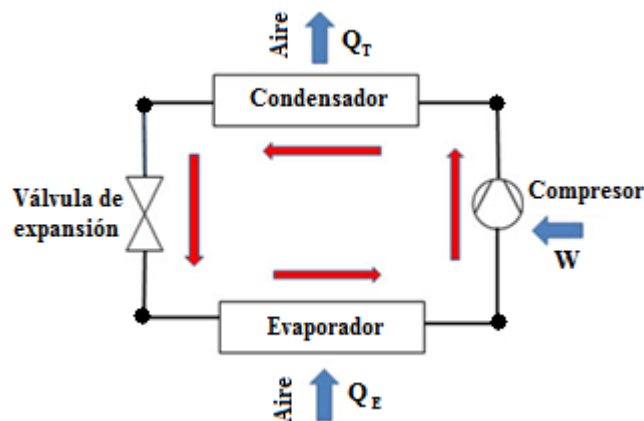


**Figura 1.11.** Voltaje eléctrico [68]

### 1.12. Bombas de calor

Las bombas de calor (BC) son una tecnología conocida para la calefacción y refrigeración de edificios y viviendas residenciales. Este tipo de máquina tiene una similitud con los refrigeradores, porque trabajan en el mismo ciclo, pero lo único que cambia es el objetivo de funcionamiento. La bomba de calor es básicamente mantener un espacio físico calentado a una temperatura alta, este proceso se logra mediante la absorción de calor desde una fuente que se encuentra a una temperatura baja [69, 70].

El ciclo real de una bomba de calor como se muestra en la Figura 1.12, comprende de dos intercambiadores de calor, uno que actúa como evaporador y otro como condensador, un compresor y un dispositivo de expansión. Estos cuatro componentes, junto con el fluido de trabajo, permiten el bombeo de calor de la fuente renovable a baja temperatura, tal como aire del ambiente, la tierra, el agua de los lagos o de mar, a una temperatura más alta, útil para la calefacción y / o agua caliente sanitaria [69].



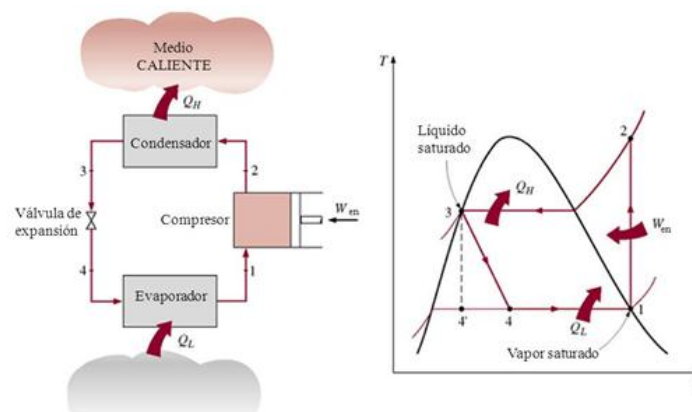
**Figura 1.12.** Ciclo de una bomba de calor [69].

### 1.12.1. Análisis termodinámico de la bomba de calor

Una bomba de calor puede ser analizada de varias formas y una de ellas es mediante el ciclo de Carnot, este es uno de los ciclos termodinámicos más eficientes para convertir una determinada energía térmica en trabajo o crear una diferencia de temperatura haciendo una determinada cantidad de trabajo. Esta forma de análisis del ciclo no se utiliza en la práctica para refrigerar. Además, la turbina se debe sustituir por un dispositivo de estrangulamiento, tal como una válvula de expansión o un tubo capilar. Cuando se realizan estos cambios, el ciclo cambia de nombre como *ciclo de refrigeración por compresión de vapor* [70, 71].

Existe una gran cantidad de dispositivos que funcionan con el ciclo de compresión de vapor, por eso el estudio de los ciclos de compresión de vapor es una parte importante de la termodinámica aplicada. El ciclo de compresión de vapor se compone de los siguientes procesos:

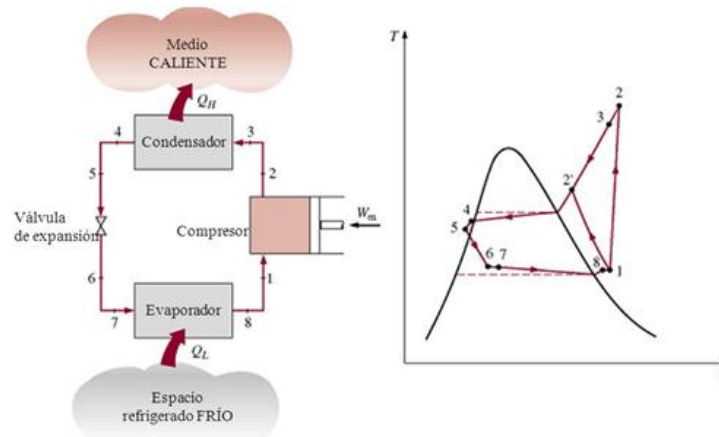
En un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, como se muestra en la Figura 1.13, el refrigerante ingresa al compresor en el **estado 1** como vapor saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión del condensador. La temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isentrópica, hasta un valor superior al de la temperatura del medio circundante. Después el refrigerante ingresa en el condensador como vapor sobrecalentado en el **estado 2** y sale como líquido saturado en el **estado 3**, como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores. El refrigerante ingresa al evaporador en el **estado 4** como un vapor húmedo de baja calidad y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado como se muestra en la siguiente figura [70].



**Figura 1.13.** Esquema y diagrama T-s de un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor [71]

Un ciclo real de refrigeración por compresión de vapor, como se muestra en la Figura 1.14, difiere de uno ideal en varios aspectos, debido a las irreversibilidades como son la fricción del fluido (causa caídas de presión) y la transferencia de calor hacia o desde los alrededores.

En el ciclo ideal, el refrigerante sale del evaporador y entra al compresor como vapor sobrecalentado. Sin embargo, en la práctica, no es posible controlar el estado del refrigerante con tanta precisión.



**Figura 1.14.** Esquema y diagrama T-s para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor [71]

El proceso de compresión en el ciclo ideal es internamente reversible y adiabático, por ende, isentrópico. Sin embargo, el proceso de compresión real de la Figura 1.14 incluirá efectos de fricción, los cuales incrementan la entropía y la transferencia de calor, lo que puede aumentar o disminuir la entropía, dependiendo de la dirección. Por consiguiente, la entropía del refrigerante puede incrementarse “*proceso 1-2*” o disminuir “*proceso 1-2*” durante un proceso de compresión real, dependiendo del predominio de los efectos [70].

El ciclo real de compresión de vapor se considera como la aplicación más frecuente en los equipos de refrigeración. La razón del éxito del ciclo real de compresión de vapor es que los compresores funcionan mejor con un vapor puro que con una mezcla de vapor y líquido [72].

El condensador y el evaporador no involucran ningún trabajo, por eso el compresor puede calcularse como adiabático. Por esa razón, las ecuaciones del coeficiente de desempeño (COP) son válidas tanto para el ciclo ideal como para el ciclo real de refrigeradores y bombas de calor, estas pueden expresarse como [70, 71, 72]:

$$COP_{Ref} = \frac{q_L}{W_{neto.entrada}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

$$COP_{BC} = \frac{q_H}{W_{neto.entrada}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

Donde

$COP_{Ref}$ :	Coeficiente de desempeño de una bomba de calor.
$COP_{BC}$ :	Coeficiente de desempeño de refrigeración.
$q_L$ :	Transferencia de calor por unidad de masa de baja $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
$q_H$ :	Transferencia de calor por unidad de masa de alta $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
$W_{neto}$ :	Trabajo neto realizado $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
$h_1$ :	Entalpia específica (estado 1) $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
$h_2$ :	Entalpia específica (estado 2) $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
$h_3$ :	Entalpia específica (estado 3) $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
$h_4$ :	Entalpia específica (estado 4) $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

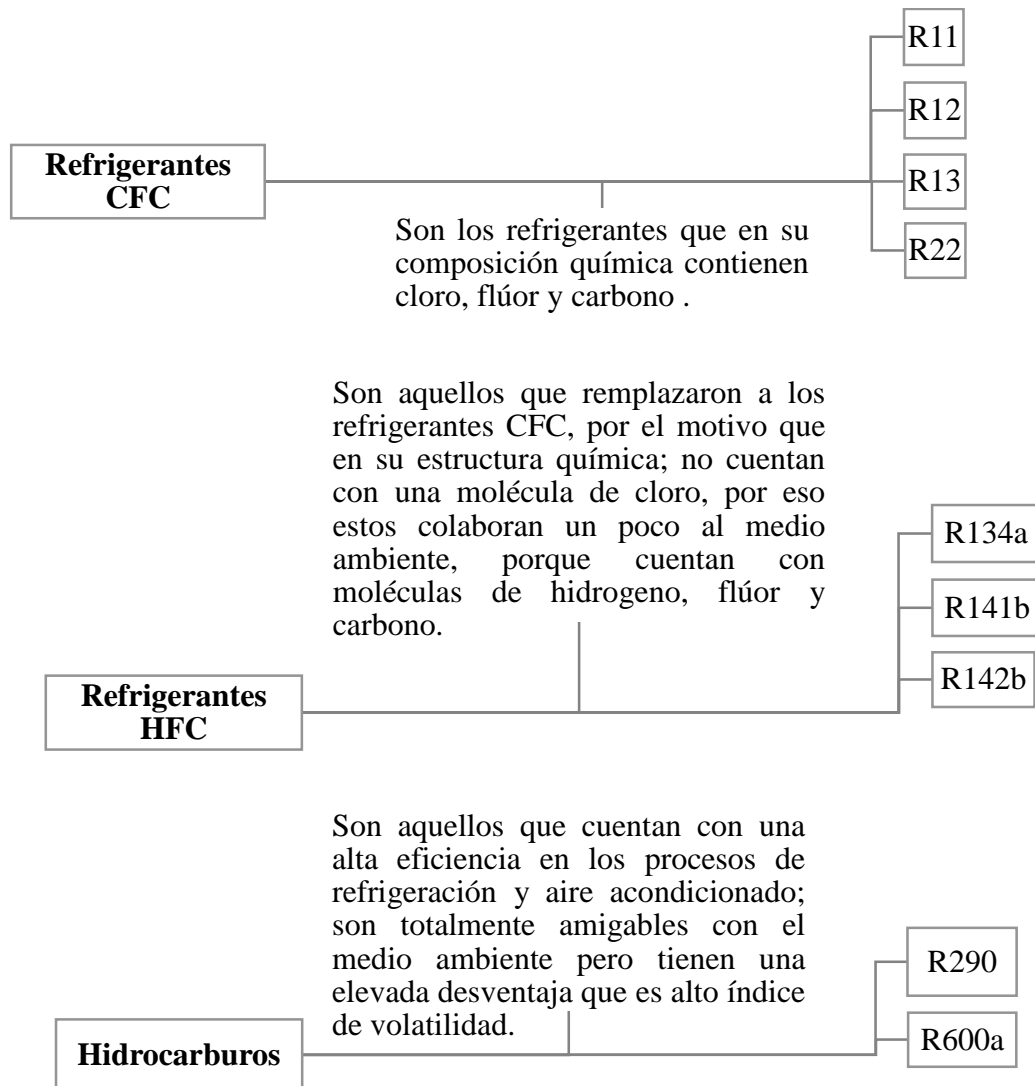
Se concluye que un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado inicial específico al estado de su ambiente, es decir, el estado muerto. Es importante comprender que la energía no representa la cantidad de trabajo que un dispositivo produce; sino que representa el límite superior de la cantidad de trabajo que puede entregar sin infringir cualquier ley termodinámica. Habrá siempre una diferencia, grande o pequeña, entre la energía y el trabajo real entregado por un dispositivo, diferencia que representa para los ingenieros la posibilidad para la mejora [70].

### 1.13. Clasificación de los refrigerantes

El refrigerante es un fluido con propiedades físicas que puede producir enfriamiento por evaporación y transportar el calor, además al estar siempre en fase líquida su bombeo es bajo.

La clasificación se fundamenta en base al trabajo y la capacidad que posee el refrigerante para absorber calor a baja temperatura, cambiando de fase líquida a vapor y viceversa; también depende de varias condicionantes tales como su estabilidad

química, conductividad térmica, propiedades físicas, semejanza con los materiales, y sobre todo el costo [73].



A continuación, se detallarán algunas características de los refrigerantes más relevantes para la investigación.

#### 1.14. Refrigerante 134a

Un refrigerante se lo cataloga como cualquier fluido, que posee la capacidad de modificar su fase natural; de acuerdo a la variación de parámetros que se lo somete en un sistema termodinámico, teniendo en cuenta la conservación del medio ambiente [74].

El refrigerante 134a es un gas de modelo hidrofluorocarbono (HFC) que es un poco amigable con la capa de ozono. También tiene una baja toxicidad y sobre todo no es volátil con la presencia del aire a temperaturas inferiores a 100 °C.

El refrigerante 134a es manipulado por la mayoría de los fabricantes de máquinas, debido a su excelente eficacia [75] y nació como un ideal sustituto al refrigerante 12 en aplicaciones tales como:

- Aparatos de aire acondicionado
- Aire acondicionado industrial (grupos de refrigeración rápida)
- Refrigeración doméstica
- Refrigeración comercial y de transporte

### **1.15. Refrigerante 12**

Los Hidroclorofluorocarbonos (HCFC) son sustancias que pueden agotar la capa estratosférica protectora de la capa de ozono de la Tierra y también son gases de efecto invernadero, con lo cual pueden contribuir seriamente con el cambio climático [76].

### **1.16. Hidrocarburos**

Son refrigerantes ecológicos que han sido usados desde 1867 y en conjunto con el amoníaco fueron los refrigerantes más utilizados antes de la implementación de los refrigerantes químicos a partir del año 1930 [77]. Según Saeng et al. [78], los refrigerantes ecológicos son sustancias naturales obtenidas del gas natural y de la manipulación de crudos, estos se pueden ocupar de la siguiente forma.

- Seguros de usar con el manejo apropiado.
- Alta eficiencia, reducen la energía utilizada en refrigeración y en sistema de acondicionamiento de aire.

#### **1.16.1. Tipos de hidrocarburos**

Según Danfoss [79], se clasifican en:

- R290 (propano)
- R600a (Isobutano)

##### **1.16.1.1. Refrigerante ecológico propano R290**

El propano es una solución muy conveniente para la implementación en la refrigeración y el aire acondicionado, ya que es seguro para el medioambiente. No sólo ofrece una gran reducción de las emisiones directas, sino que también aumenta la eficiencia energética y reduce las emisiones indirectas, lo que es un paso importante para sustituir y lograr la eliminación gradual de los (HCFC) [80, 81, 82].

Los principales cambios que sufre una unidad de aire acondicionado al sustituir con un hidrocarburo R290 son los siguientes [83]:

- Aumento en el tamaño y el costo del compresor.
- Aumento en el costo de los componentes eléctricos.

#### **1.16.1.2. Refrigerante hidrocarburo Isobutano R-600a**

El Isobutano (R-600a) ha sido utilizado en sus inicios en los congeladores.

Las características del R-600a son distintas a las del R-134a utilizado en los refrigeradores domésticos. Algunas de sus cualidades son:

- El nivel de presión de trabajo es más bajo.
- Alta sensibilidad a las desviaciones en la carga.
- Las cargas inadecuadas producen altos consumos de energía [79].

Estos refrigerantes ecológicos, proceden de los procesos de refinamiento de residuos fósiles; los cuales en su estructura molecular contienen residuos de materiales inflamables, por lo cual estos refrigerantes son altamente peligrosos y de difícil accesibilidad.

A continuación, se realiza la descripción del acople del sistema solar fotovoltaico, mediante el desarrollo de la información de todos los componentes que tiene este sistema. El manejo de la información se la realizará de forma concisa y resumida para una mejor apreciación del funcionamiento de los componentes del sistema fotovoltaico.

### **1.17. Componentes de un sistema fotovoltaico**



### 1.17.1. Panel fotovoltaico

Se lo llama también panel solar, este dispositivo permite transformar la energía solar en energía eléctrica, existen investigaciones como la de Fernández [84], donde se los llaman módulo fotovoltaico porque está conformado de varias celdas fotovoltaicas y estas lo que hacen es transformar la energía de la radiación solar en corriente continua (DC) a un sistema cualquiera [85]. Esta celda fotovoltaica está formada por un material semiconductor, mediante una delgada lámina que suele ser de silicio que se utiliza en la industria electrónica, puesto que el costo del silicio no es tan elevado [85, 86]. Como dato interesante, es que el silicio debe ser de alta pureza con el motivo de que se pueda lograr el efecto fotovoltaico poniendo como una limitante en el proceso de producción de celdas fotovoltaicas [87].



**Figura 1.15.** Paneles fotovoltaicos [87].

Las características principales de un panel solar fotovoltaico que todo proveedor debe entregar se muestran en la Tabla 1.5.

**Tabla 1.5.** Características de un panel fotovoltaico.

Denominación	Descripción
V <sub>mp</sub>	Voltaje máximo del panel
I <sub>MP</sub>	Corriente máxima que soporta el panel
WP	Potencia del panel en condiciones ideales

La clasificación de los paneles fotovoltaicos en el mercado sea nacional como internacional, vienen dado por varias características y formas.

- **Módulos de silicio monocristalino**

Estos son los que más se utilizan, ya sea de manera doméstica como industrial, debido a su gran confiabilidad y duración como se muestra en la Figura 1.16, su precio es de USD 200 lo que representa un costo elevado a comparación con los otros tipos de paneles, su rendimiento energético es del 15 al 17 %, con relación a los módulos policristalinos y amorfos [86, 87].



**Figura 1.16.** Módulo de silicio monocristalino [84].

- **Módulos de silicio policristalino.**

Estos en cambio tienen un precio de USD 150 y son más baratos que los monocristalino porque su eficiencia es menor pero no de manera drástica, su rendimiento energético va desde 12-14 %, con relación a los módulos amorfos [84]. A continuación, se muestra en la Figura 1.17.



**Figura 1.17.** Módulo de silicio policristalino [85].

- **Módulos de silicio amorfo**

Estos módulos tienen características peculiares, como los bajos precios, su diseño muy delgado y es de alta flexibilidad como se muestra en la Figura 1.18, estos pueden ser instalados como parte integral de los techos, paredes o ventanas [85], según Fernández [84], la eficiencia energética de estos paneles va desde el 10 % para bajo, dependiendo su tamaño.



**Figura 1.18.** Módulo de silicio amorfo [86].

### 1.17.2. Sistema de almacenamiento

Estos sistemas se los conocen con el nombre de baterías como se muestra en la Figura 1.19, permiten almacenar la energía eléctrica que reciben de los paneles fotovoltaicos, para luego poder distribuir la electricidad a los equipos cuando estos lo requieran [85, 62], dentro de un sistema fotovoltaico las baterías realizarán tres funciones importantes:

- Almacenamiento de energía eléctrica cuando la radiación solar es tan grande o cuando no se consume energía eléctrica de manera habitual [87].
- Distribución de forma estable y adecuada de la energía eléctrica para cada uno de los aparatos electrónicos en el hogar [87].
- Proporción necesaria de energía eléctrica cuando exista radiación solar baja o casi nula, por ejemplo, en lugares rurales que no tienen acceso a energía eléctrica, se utiliza esta energía almacenada en las noches para utilizar las luminarias, el televisor o una radio [86, 84].



**Figura 1.19.** Batería para paneles fotovoltaicos [86].

Según Fernández [84], un sistema solar fotovoltaico, puede funcionar sin el banco de baterías debido a que la generación de corriente eléctrica se realiza en los paneles solares fotovoltaicos, por lo cual estos pueden ser conectados directamente al inversor para encender cualquier máquina, pero si no hay la suficiente radiación solar o la condición adecuada el sistema no funciona, por eso es necesario conectar un banco de

batería para almacenar la corriente que producen los paneles y así ocupar cuando las condiciones no sean idóneas.

### 1.17.3. Regulador o controlador de carga

Este dispositivo electrónico controla el flujo de corriente de carga que vendrá desde los paneles fotovoltaicos hacia la batería, y de igual manera la corriente que va desde la batería hacia los equipos que utilizan la electricidad [87]. Su función adicional es la de interrumpir el paso de corriente de los paneles a la batería si la misma ya se encuentra cargada por completo y de igual manera si la o las baterías se han descargado en su nivel máximo o antes del mismo, el regulador corta el paso de corriente desde la batería hacia los equipos conectados en el sistema de almacenamiento [85, 86]. A continuación, se observa en la Figura 1.20.



**Figura 1.20.** Conexión de un regulador de carga en un sistema fotovoltaico [88].

Generalmente, este regulador de carga es el dispositivo más confiable en el sistema fotovoltaico, siempre y cuando se lo dimensione e instale adecuadamente.

### 1.17.4. Inversor

En el sistema fotovoltaico, la distribución de energía eléctrica no está del todo completa sin el inversor, la razón es porque no todos los dispositivos que se tiene en el hogar son de corriente alterna, por lo tanto, se necesita de un dispositivo que pueda proveer de energía eléctrica a todos los equipos, sean de corriente alterna o directa. Es por eso que la función del inversor es de proveer energía en la cantidad calidad y tipo que se necesita [62, 86, 87].

Como está escrito en el párrafo anterior, el tipo de energía que se debe entregar a los equipos es de 120 V o 110 V de corriente alterna para que funcionen. Los módulos fotovoltaicos proveen corriente directa a 12 o 24 Voltios por lo que se requiere de un dispositivo adicional, el inversor, que transforme, a través de componentes electrónicos, la corriente directa a 12 V de la batería en corriente alterna a 120 V [85, 86], como se muestra en la Figura 1.21.



**Figura 1.21.** Inversor de onda senoidal pura de 12V-6000W




El principio de funcionamiento de un sistema fotovoltaico se basa en transformar directa e instantáneamente la energía solar en energía eléctrica sin requerir de algún tipo de combustible. Además, esta tecnología fotovoltaica se aprovecha del efecto fotoeléctrico. La célula fotovoltaica está compuesta de silicio de alta pureza. En el silicio, se forma una unión positivo-negativo (PN) como barrera potencial [87].

Los fotones que se precipitan en la unión PN provocan el aumento de pares de portadores de carga eléctrica opuestos, que como resultado de la presencia de la unión PN se separan en dos direcciones diferentes. Los electrones van al semiconductor N y los orificios van al semiconductor (P). Dando como resultado la corriente eléctrica.

### **1.18. Selección de alternativas**

A continuación, se realiza la descripción de algunas alternativas de implementación de paneles fotovoltaicos en la Tabla 1.6 y de refrigerantes para la bomba de calor en la Tabla 1.7.

**Tabla 1.6.** Alternativas de paneles fotovoltaicos

Componente	Gráfico	Descripción
Panel de silicio Monocristalino		Según Tabatabaei et al. [86, 87, 55], estos son los que más se utilizan, en las viviendas domesticas como en las industrias. Tienen una vida útil de 25 - 35 años.
Panel de silicio Policristalino		Bilir et al. [84, 57], dice que estos son más baratos que los Monocristalino. Tienen una eficiencia desde 12 – 14 % y una vida útil de 23 – 27 años.
Panel de silicio Amorfo		Según Rocchetti et al. [84, 52], estos tienen una forma flexible y pueden ser instaladas como parte integral de un techo. La eficiencia es menor del 10 % y tiene una vida útil de 10 - 17 años.

**Tabla 1.7.** Alternativas de refrigerantes

Componente	Referencia	Descripción
Refrigerante	R-600a	Ghorbania et al. [79, 89], menciona que este tipo de refrigerante es ecológico, tiene un nivel de presión de trabajo bajo, alta sensibilidad a las desviaciones en la carga y alta inflamabilidad.
Refrigerante	R-290a	Es una solución muy conveniente para la implementación en la refrigeración y calefacción, pero tiene un grado alto de inflamabilidad [80, 81, 82].
Refrigerante	R-134a	Según Wang et al. [75, 90, 91], este refrigerante tiene una gran estabilidad térmica y química, una baja toxicidad y no es inflamable, además de tener una compatibilidad con la mayoría de los materiales.

Luego de analizar las alternativas de implementación de las Tablas 1.6-1.7, se establece que los paneles de silicio monocristalinos y el refrigerante 134a, son los idóneos para la construcción e implementación de un sistema de paneles solares fotovoltaicos para el funcionamiento de una bomba de calor. La viabilidad del presente proyecto se basa, en que no existen investigaciones recientes de esta implementación de paneles fotovoltaicos en el país, además que la información investigada, arroja como resultado una eficiencia alta y durabilidad del proyecto, también se tiene un impacto ambiental muy bajo que es de 0,0664 toneladas de  $CO_2$ .

A partir de la selección de los componentes se procede con los cálculos necesarios para su implementación y puesta en funcionamiento. Cabe indicar que, el análisis de las alternativas para la implementación de los paneles fotovoltaicos y sustitución del refrigerante proporcionó un amplio conocimiento teórico del funcionamiento y características de cada uno de ellos, lo que favorece tanto en el ensamble, como en la puesta en marcha del sistema fotovoltaico.



## CAPÍTULO II

### DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA UNA BOMBA DE CALOR

En este capítulo se realizan los cálculos de los parámetros requeridos para la implementación de un sistema de paneles solares fotovoltaicos. Se lleva a cabo la utilización de dos tipos de diseño del cálculo del número de paneles solares fotovoltaicos y baterías, los cuales son indispensables para el funcionamiento de la bomba de calor. Además, se determina los cálculos del comportamiento del refrigerante 134a de la bomba de calor mediante el ciclo ideal, el ciclo real y el coeficiente de operación.

#### 2.1. Bomba de calor

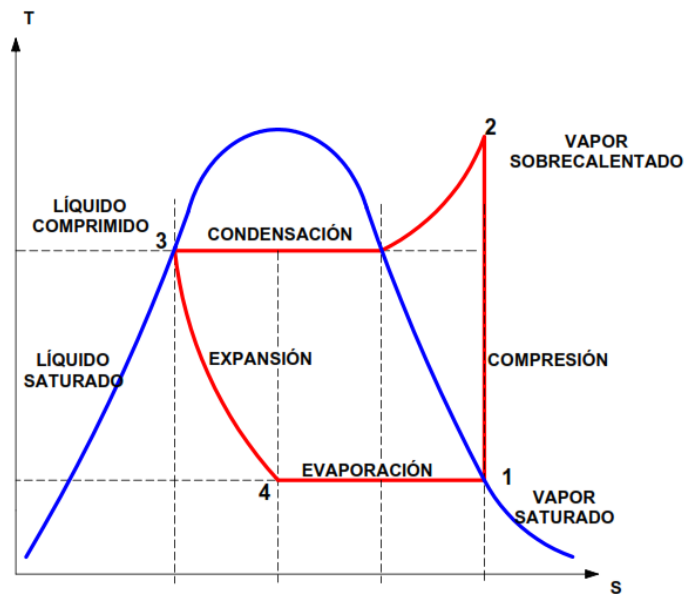
Fue dimensionada y construida por Orbea y Vega [92], pero tenía varias irregularidades en su funcionamiento, lo cual implica que todos los datos tabulados no sean fiables para la investigación, por eso fue necesario realizar varias mejoras en la bomba de calor, tanto en su funcionamiento como en lo visual. Una vez realizada todas las modificadas se procedió a verificar si cumple las condiciones termodinámicas del ciclo de refrigeración y bomba de calor desarrolladas por Çengel [70] y Donald [71]. A continuación, se muestra la bomba de calor mejorada en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Bomba de calor.

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el que más se utiliza en bombas de calor y se compone de cuatro procesos [70]. Como se observa en la Figura 2.2

- 1-2 Compresión isentrópica en un compresor.
- 2-3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión.
- 4-1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador.



**Figura 2.2.** Diagrama T-s para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor

### 2.1.1. Información técnica de la bomba de calor

Según Orbea y Vega [92], la bomba de calor cumple con todos los ciclos termodinámicos, se realizó una prueba de verificación, dando como resultado falencias en el funcionamiento y los cálculos que se encuentran en dicha tesis tienen errores. En vista de estas falencias se realizó varias mejoras en la bomba de calor, las cuales son conectar un sistema de control para el encendido y apagado del compresor, porque el modelo antiguo no contaba con este sistema y lo forzaba, lo cual provocó una disminución rápida de la vida útil del compresor, además se elaboró un panel de control donde se colocó nuevos manómetros y sensores de temperatura digitales, porque los instrumentos que se encontraban en la bomba de calor eran muy rudimentarios, dando así una mejor visualización y entendimiento del ciclo termodinámico de refrigeración y bomba de calor, también se ejecutó un mantenimiento en toda la bomba de calor, tanto en el sistema de tuberías como en el cambio del filtro deshidratador, adicional se

cargó el gas de trabajo que es el refrigerante 134a. Las características de cada componente se puntualizan a continuación en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Parámetros empleados en la bomba de calor.

ELEMENTO	SISTEMA	DESCRIPCIÓN
COMPRESOR	Tipo: Reciprocante	Velocidad fija
	Capacidad de refrigeración	$5592 \left[ \frac{\text{Btu}}{h} \right]$
	Eficiencia	$7,18 \left[ \frac{\text{Btu}}{Wh} \right]$
	Potencia de entrada	$774 [W]$
	Refrigerante R134a (carga)	$600 [kg]$
CONDENSADOR	Área del tanque	$6,082 \cdot 10^{-3} [m^2]$
	Área exterior del tubo	$0,127 [m]$
	Área interior del tubo	$0,11074 [m]$
	Área de transferencia de calor	$0,307 [m^2]$
	Espesor del tubo	$0.8128 [m]$
	Capacidad térmica	$0,156 \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$
EVAPORADOR	Área del tanque	$6,082 \cdot 10^{-3} [m^2]$
	Área exterior del tubo	$0,127 [m^2]$
	Área interior del tubo	$0,11074 [m^2]$
	Área de transferencia de calor	$0,278 [m^2]$
	Espesor del tubo	$0.8128 [m]$
	Capacidad térmica	$0,156 \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$
FILTRO DESHIDRATADOR	Capacidad	$6 [ton]$

Detalladas las características de cada componente de la bomba de calor, se analiza la factibilidad de instalar un sistema sustentable como son los paneles solares fotovoltaicos, los cuales son compatibles con cualquier equipo eléctrico. Para esto se requiere conocer la potencia de entrada en el compresor de la bomba de calor, la cual se conoce en la Tabla 2.1.

Con el valor de la potencia de entrada que es de 774 W, se procede al cálculo de la implementación de un sistema fotovoltaico.

## **2.2. Característica de la implementación de un sistema fotovoltaico**

La implementación de un sistema fotovoltaico tiene la función de reemplazar la energía eléctrica de la red interconectada nacional, a una energía eléctrica desarrollada por una fuente renovable que proviene de la radiación solar. Las características de implementación de los paneles fotovoltaicos se mencionan a continuación.

Se describir las características y los dos tipos de diseños de cálculo del sistema fotovoltaico para el funcionamiento del compresor de la bomba de calor y los equipos de laboratorio de la universidad. A estos diseños se los designan como “Diseño A” y “Diseño B”.

## **2.3. “Diseño A” dimensionamiento del sistema fotovoltaico**

El dimensionamiento e implementación de los paneles fotovoltaicos, para el encendido del compresor de una bomba de calor, requiere del valor de 744 W de potencia [93] y el tiempo estimado de funcionamiento que es de 1 hora, con un margen de seguridad recomendado del 20 %.

$$P = 744 (W)$$

$$t = 1 (h)$$

Donde:

$P$  : Potencia;  $[W]$

$t$  : Tiempo;  $[h]$

**Tabla 2.2.** Consumo de la bomba de calor [93].

Unidad de carga	Potencia unitaria (W)	Horas de funcionamiento al día (h)	Total energía necesaria (W · h)	Total energía necesaria (W · h) · Margen seguridad (20%)
Bomba de Calor	744	1	744	892,8
<b>Total</b>			$744 \frac{W \cdot h}{día}$	$892,8 \frac{W \cdot h}{día}$

#### 2.4. Consumo medio diario crítico

Para el cálculo del consumo medio diario crítico ( $L_{mdcrit}$ ), se considera que la instalación puede tener pérdidas por rendimiento del inversor ( $\eta_{inv}$ ), batería ( $\eta_{bat}$ ), y conductor ( $\eta_{con}$ ); por eso cada uno de estos rendimientos tiene un valor porcentual de 90, 95 y 100 % respectivamente, también recopila el valor del consumo total de la bomba de calor de la Tabla 2.2 [94, 95].

$$L_{mdcrit} = \frac{\frac{L_{md}}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{cond}} \quad (6)$$

$$L_{mdcrit} = \frac{\frac{892,8}{0,9}}{0,95 \cdot 1} = 1044,21 \left( \frac{W \cdot h}{día} \right)$$

Donde:

$L_{md}$  : Consumo medio diario (bomba de calor) [W h]

$L_{mdcrit}$  : Consumo medio diario critico  $\left[ \frac{W \cdot h}{día} \right]$

$\eta_{inv}$  : Rendimiento del inversor de un 90 %

$\eta_{bat}$  : Rendimiento del batería de un 95 %

$\eta_{con}$  : Rendimiento de conductor de un 100 %

También se expresa como el consumo de energía medio  $Q_{Ah}$  en  $\left[ \frac{A \cdot h}{día} \right]$  [94, 8].

$$Q_{Ah} = \frac{L_{md}}{V_{Bat}} \quad (7)$$

$$Q_{Ah} = \frac{892,8}{12} = 74,4 \left( \frac{A \cdot h}{día} \right)$$

Donde:

$Q_{Ah}$  : Consumo de energía medio  $\left[ \frac{A \cdot h}{día} \right]$

$V_{Bat}$  : Voltios de la batería [V]

Para obtener el consumo máximo, se consideran las pérdidas, por tratarse de una instalación que se utiliza en una ubicación con alta irradiación, se escoge un valor de 2 días de autonomía [94].

$$KT = 0,7 - (0,0058 \cdot D_{aut}) \quad (8)$$

$$KT = 0,7 - (0,0058 \cdot 2)$$

$$KT = 0,69$$

Consumo máximo de la instalación.

$$C_{max} = \frac{Q_{ah}}{KT} \quad (9)$$

$$C_{max} = \frac{74,4}{0,69}$$

$$C_{max} = 107,83 \left( \frac{A \cdot h}{día} \right)$$

Donde:

$KT$  : Pérdidas totales

$D_{aut}$  : Días de autonomía

$C_{max}$  : Consumo máximo de la instalación  $\left[ \frac{A \cdot h}{día} \right]$

## 2.5. Cálculo del número de paneles fotovoltaicos

Realizado los cálculos del consumo de la bomba de calor, se procede a recopilar los datos de radiación solar del Distrito Metropolitano de Quito, utilizando dos fuentes distintas de datos que son; Atlas Solar del Ecuador y software (Meteonorm 7), considerando que se debe realizar una comparación de datos de las dos fuentes de consulta como se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Radiación solar en el Distrito Metropolitano de Quito.

Mes	Atlas solar del	Software
	Ecuador	(Meteonorm 7)
	$\frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día}$	$\frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día}$
Enero	4,95	5,68
Febrero	4,95	5,57
Marzo	4,65	5,84
Abril	4,80	5,60
Mayo	4,80	5,10
Junio	4,95	5,37
Julio	5,25	5,58
Agosto	5,55	5,90
Septiembre	5,98	6,30
Octubre	5,40	5,77
Noviembre	5,25	5,53
Diciembre	5,10	5,45

En la Tabla 2.3, se observa dos fuentes de investigación, el Atlas Solar del Ecuador y el software Meteonorm 7, los cuales proporcionan datos de la radiación solar de los doce meses del año. Según Pareja [94], los valores de la radiación solar que se deben utilizar para el cálculo del sistema solar fotovoltaico es del Atlas Solar del país que se va implementar este sistema, explicado la fuente de consulta se realiza una comparación de los meses más críticos, que son marzo, abril y mayo donde tienen una radiación (4,65 - 4,80 - 4,80)  $\frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día}$  respectivamente, se realiza el promedio de los

meses más críticos o a su vez, se recomienda escoger el menor valor de los doce meses [94]. Este valor corresponderá al mes del año donde la relación entre el consumo de energía y la irradiación disponible será menor, este valor puede ayudar a no ocasionar un sobredimensionamiento para los otros meses. Por esa razón se debe analizar y valorar el mes con un índice crítico de radiación como son marzo; con un valor de  $4,65 \frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día}$  [94, 96].

Se procede al cálculo la energía diaria que puede producir cada panel.

$$I_{MPP} = 6,74 (A)$$

$$HPS_{crit} = \frac{\text{Irradiación del mes crítico}}{1000 \left( \frac{W}{m^2} \right)} \quad (10)$$

$$HPS_{crit} = \frac{4650}{1000} = 4,65 (h)$$

$$PR = 0,9$$

$$E_p = I_{MPP} HPS_{crit} PR \quad (11)$$

$$E_p = (6,74)(4,65)(0,9) = 28,21 \left( \frac{Ah}{día} \right)$$

Donde:

$E_p$ : Energía diaria que produce el panel;  $\left[ \frac{A \cdot h}{día} \right]$

$I_{MPP}$ : Corriente Máxima del panel en condiciones estándar;  $[A]$

$HPS_{crit}$ : Horas del sol pico del mes crítico  $[h]$

$PR$ : Factor global de funcionamiento que oscila entre 0,65-0,9. Se usa 0,9 por defecto.

Calculada la energía diaria que puede producir cada panel, se determina el número de paneles que se requiere para el funcionamiento de la bomba de calor [94].



$$N_T = \frac{C_{\max}}{E_p} \quad (12)$$

$$N_T = \frac{107,83}{28,21} = 3,82 \cong 4$$

Donde:

$N_T$  :Número total de paneles

Para saber el tipo de conexión de los paneles solares fotovoltaicos se considera los siguientes parámetros  $V_{\max} = 21,8$  (V) del panel y el voltaje de la batería de  $V_{Bat} = 12$  (V) [94]. conocido estos valores se procede a definir si son conectados en serie o paralelo con las siguientes ecuaciones.

$$N_{serie} = \frac{V_{Bat}}{V_{MOD,MPP}} \quad (13)$$

$$N_{serie} = \frac{12}{21,8} = 0,55 \cong 1$$

$$N_{paralelo} = \frac{N_T}{N_{serie}} \quad (14)$$

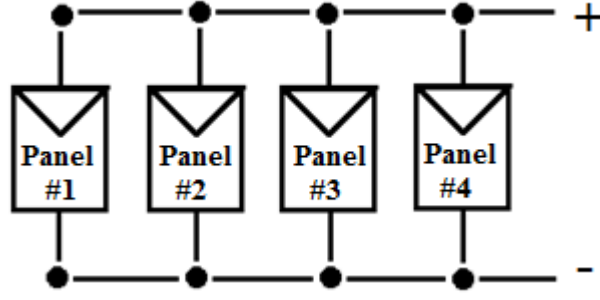
$$N_{paralelo} = \frac{4}{1} = 4$$

Donde:

$N_{serie}$  : Número de paneles conectados en serie

$N_{paralelo}$  : Número de paneles conectados en paralelo

Obtenido el resultado del número de paneles, se considera un ensamble compuesto por 4 ramas en paralelo, que deben ser independientes del uno al otro, con la misma corriente, como se muestra en la Figura 2.3, debido a que se tiene una instalación fotovoltaica aislada que necesita de una mayor cantidad de corriente al sistema.



**Figura 2.3.** Esquema de conexión de los paneles.

## 2.6. Dimensionamiento de las baterías

Para el dimensionamiento de las baterías se debe recordar dos parámetros importantes que son la máxima profundidad de descarga (estacionaria y diaria) ( $P_{D_{\max,E}}$ ), ( $P_{D_{\max,d}}$ ) y el número de días de autonomía ( $D_{aut}$ ) [94, 97].

$$P_{D_{\max,d}} = 60 \% = 0,6 \quad (15)$$

$$D_{aut} = 2$$

Capacidad del campo de baterías:

$$C_{bat} = \frac{C_{\max} D_{aut}}{P_{D_{\max}}} (Ah) \quad (16)$$

$$C_{bat} = \frac{(107,83)(2)}{0,6} (Ah)$$

$$C_{bat} = 359,43 (Ah)$$

Donde:

$C_{bat}$  : Capacidad del campo de la batería

$P_{D_{\max}}$  : Profundidad de descarga máxima

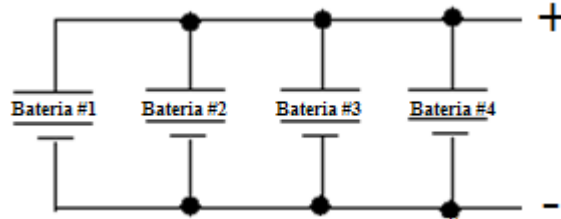
Calculada la capacidad del campo de la batería se procede a determinar el número de baterías [94, 97].

$$N_{bat} = \frac{C_{bat}}{C_{nom}} \quad (17)$$

$$N_{bat} = \frac{359,43}{100}$$

$$N_{bat} = 3,59 \cong 4$$

Obtenido el resultado, conectar 4 ramas en paralelo de 1 batería, como se muestra en la Figura 2.4, para obtener una salida de dos veces la capacidad de las baterías.



**Figura 2.4.** Esquemas de conexión de baterías

A continuación, se desarrolla el cálculo de otra metodología de diseño para un sistema fotovoltaico.

## 2.7. “Diseño B” dimensionamiento del sistema fotovoltaico

El procedimiento que se llevará a cabo para el diseño de un sistema fotovoltaico es conocer la potencia total y el consumo de energía de todas las cargas que deben ser alimentadas por el sistema fotovoltaico.

Potencia total del uso de la aplicación

$$P = 744 \text{ (W)}$$

$$t = 1 \text{ (h)}$$

$$P_T = P \cdot t \quad (18)$$

$$P_T = (744)(1)$$

$$P_T = 744 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}}$$

Donde.

$$P_T : \text{Potencia} \left[ \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}} \right]$$

$$t : \text{Tiempo} \left[ \text{h} \right]$$

Potencia total de energía requerida de los paneles

$$P = 744 \frac{W \cdot h}{\text{día}} \cdot 1,5 \quad (19)$$

$$P_T = 1116 \frac{W \cdot h}{\text{día}}$$

El factor de seguridad que recomienda Abella [98] por defecto es 1.5 para el cálculo del número de paneles solares fotovoltaicos.

## 2.8. Cálculo del número de paneles solares fotovoltaicos

Para el cálculo del número de paneles solares fotovoltaicos, se analiza diferentes aspectos como son; las dimensiones de los módulos fotovoltaicos porque pueden producir una cantidad de potencia variable.

El vatio pico (Wp) producido por el módulo fotovoltaico y el clima de la ubicación del sitio. También se considera el "factor de generación del panel" que es diferente en cada ubicación geográfica. Para determinar la capacidad de los módulos fotovoltaicos, se calcula de la siguiente manera [98, 99].

$$C_{\max} = \frac{P_T}{(\text{HPS})(0,62)} \quad (20)$$

$$C_{\max} = \frac{1116}{(4,65)(0,62)}$$

$$C_{\max} = 387,09 \text{ (Wp)}$$

Donde:

$C_{\max}$  : Capacidad máxima de los paneles [Wp]

**Número de paneles necesarios:**

$$N_T = \frac{C_{\max}}{110} \quad (21)$$

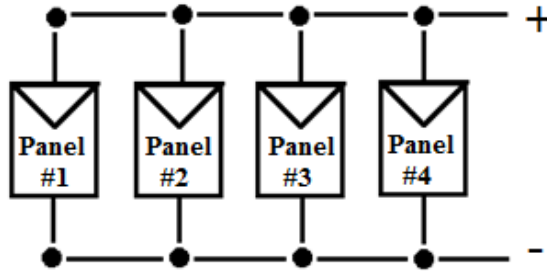
$$N_T = \frac{387,09}{110}$$

$$N_T = 3,52 \cong 4$$

Donde:

$N_T$  : Número total de paneles

Obtenido el resultado del número de paneles, se considera un ensamble compuesto por 4 ramas en paralelo con 1 panel, como se muestra en la Figura 2.5, debido a que se tiene una instalación fotovoltaica aislada.



**Figura 2.5.** Esquema de conexión de los paneles.

## 2.9. Dimensionamiento de las baterías

Para el dimensionamiento de las baterías se requieren que sean de ciclo profundo. Estas baterías de ciclo profundo están específicamente diseñadas para ser descargadas a bajo nivel de energía y recargarse rápidamente día tras día durante todos los años [100, 101].

Las baterías deben ser lo considerablemente grandes como para almacenar la energía suficiente para operar el compresor de la bomba de calor en días nublados y en las noches. Para conocer la capacidad de las baterías se realiza el siguiente cálculo [98, 99].

$$C_{bat} = \frac{P D_{aut}}{(0,85)(0,6) V_{bat}} \quad (22)$$

$$C_{bat} = \frac{(1116) (2)}{(0,85)(0,6)(12)}$$

$$C_{bat} = 364,71 (A \cdot h)$$

Donde:

$C_{bat}$  : Capacidad de la batería  $[A \cdot h]$

**Número total de baterías:**

$$N_{bat} = \frac{C_{bat}}{100} \quad (23)$$

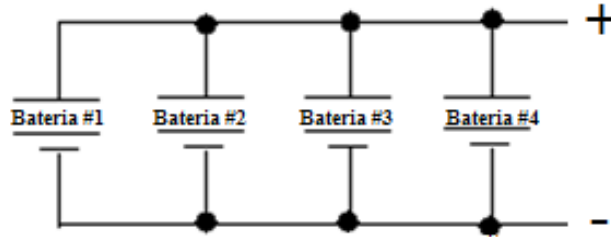
$$N_{bat} = \frac{364,71}{100}$$

$$N_{bat} = 3,64 \cong 4$$

Donde:

$N_{bat}$  : Número total de baterías

Obtenido el resultado, se conecta 4 ramas en paralelo, como se muestra en la Figura 2.6, para conseguir una salida de dos veces la capacidad de las baterías.



**Figura 2.6.** Esquemas de conexión de baterías.

Desarrollado los dos diseños, se obtuvo una igualdad de resultados para la implementación de un sistema solar fotovoltaico. El “**Diseño A**”, es el más exacto, debido a que en su estructura de análisis para el dimensionamiento utiliza cálculos minuciosos para cada componente del sistema, y esto favorece a la investigación.

## **2.10. Orientación e inclinación de los módulos**

### **2.10.1. Orientación del módulo fotovoltaico**

La orientación tiene como norma ubicar los módulos de acuerdo a la posición de los hemisferios, en el Ecuador se encuentra sobre la línea equinoccial, por lo cual los módulos fotovoltaicos pueden orientarse hacia el sur como hacia al norte, sin ningún inconveniente [94].

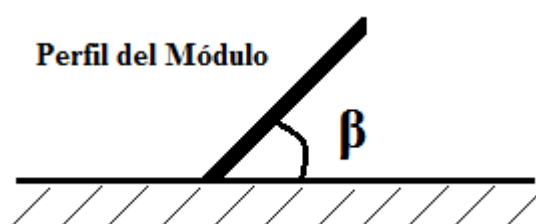
El edificio donde se va a realizar la instalación del sistema solar fotovoltaico es en el campus Sur de la Universidad Politécnica Salesiana, la cual se encuentra ubicado en la urbe del Distrito Metropolitano de Quito (provincia de Pichincha, Ecuador), según lo definen las siguientes coordenadas:

- Coordenadas Geográficas (DMS):  $0^{\circ} 13' 31''$  Sur,  $78^{\circ} 31' 29''$  Oeste
- Coordenadas Decimales: Latitud: -0.225219, Longitud: -78.5248

### 2.11. Inclinación

La inclinación es en el ángulo que forma el panel fotovoltaico con la superficie horizontal. La función de inclinación cumple un rol fundamental, para la captación de energía solar ya que puede variar y será máxima cuando la posición de la placa sea perpendicular con la irradiación [94].

En la figura 2.7 se muestra la inclinación del panel con el ángulo  $\beta$ . Su valor es  $0^{\circ}$  para un módulo horizontal y  $90^{\circ}$  para un módulo vertical.



**Figura 2.7.** Inclinación.

El ángulo  $\beta$  se determina en base a la Tabla 2.4 de inclinaciones en función de la latitud.

**Tabla 2.4.** Tabla de inclinación en función de la latitud [94].

Latitud del lugar	Ángulo es invierno	Ángulo en verano
0 al $15^{\circ}$	$15^{\circ}$	$15^{\circ}$
15 a $25^{\circ}$	Latitud	Latitud
25 a $30^{\circ}$	Latitud + $5^{\circ}$	Latitud - $5^{\circ}$
30 a $35^{\circ}$	Latitud + $10^{\circ}$	Latitud - $10^{\circ}$
$35^{\circ}$ a $40^{\circ}$	Latitud + $15^{\circ}$	Latitud - $15^{\circ}$

>40°	Latitud + 20°	Latitud - 20°
------	---------------	---------------

Para la implementación de los módulos fotovoltaicos en el Distrito Metropolitano de Quito, se considera el ángulo de 15°, porque se encuentra en el rango de 0 a 15° en su latitud.

## 2.12. Cálculo de potencia de las máquinas de laboratorio

En la Tabla 2.5 se presenta la potencia de las diferentes máquinas que se encuentran en el laboratorio de la universidad.

**Tabla 2.5.** Nómina de las máquinas de laboratorio.

Unidad de carga	Potencia unitaria (W)	Horas de funcionamiento al día (h)	Total energía necesaria (W · h)	Total energía necesaria (W · h) · Margen seguridad (20%)
FM61 Reaction Turbine	370	1	370	444
FM42 Pelton Turbine	370	1	370	444
FM51 Series & Parallel Pumps	250	1	250	300
FM 50 Centrifugal Pump	250	1	250	300
<b>Total</b>			1240 $\frac{W \cdot h}{día}$	1488 $\frac{W \cdot h}{día}$

Conocido el valor total del consumo de energía de las máquinas de laboratorio como se muestra en la Tabla 2.5, se considera que son compatibles con los cálculos de la implementación de los paneles solares fotovoltaicos para la bomba de calor. Para la



utilización del sistema fotovoltaico de capacidad de  $1000 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}}$  en los equipos de laboratorio se recomienda, conectar 2 equipos simultáneamente, por el lapso de una hora y que la bomba de calor no se encuentre conectada, debido a que el sistema fotovoltaico no abastecería la demanda necesaria para el encendido de las máquinas.

A continuación, se desarrolla el análisis matemático de la bomba de calor asistida por la energía eléctrica producida por fuentes fósiles y por un sistema solar fotovoltaico. A pesar de ser dos fuentes de generación de energía eléctrica distintas, deberá presentar resultados similares.

### 2.12.1. Análisis matemático del ciclo ideal de la bomba de calor

Se analiza una bomba de calor que utiliza refrigerante 134a como fluido de trabajo que opera en un ciclo real de refrigeración por compresión de vapor, los datos que se obtengan de estas pruebas van a variar con las de Orbea y Vega [92], debido a que se realizó mejoras en el funcionamiento de la bomba de calor. Los datos que se requiere obtener para la investigación son:

- Transferencia de calor por unidad de masa de baja
- Transferencia de calor por unidad de masa de alta
- Trabajo neto consumido
- Calidad
- $COP_{BC}$  Y  $COP_{Ref}$

Las pruebas realizadas en la bomba de calor permiten obtener los datos de las presiones y temperaturas, estas se verifican mediante tablas dinámicas en Microsoft Excel para constatar que cumplan el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor. Se desarrolla un ejercicio con los datos tomados de una de las pruebas para constatar que las adecuaciones que se hicieron a la bomba de calor estén correctas y se realizó un diagrama T-s para mostrar el comportamiento del refrigerante 134a como se muestra en la Figura 2.8.

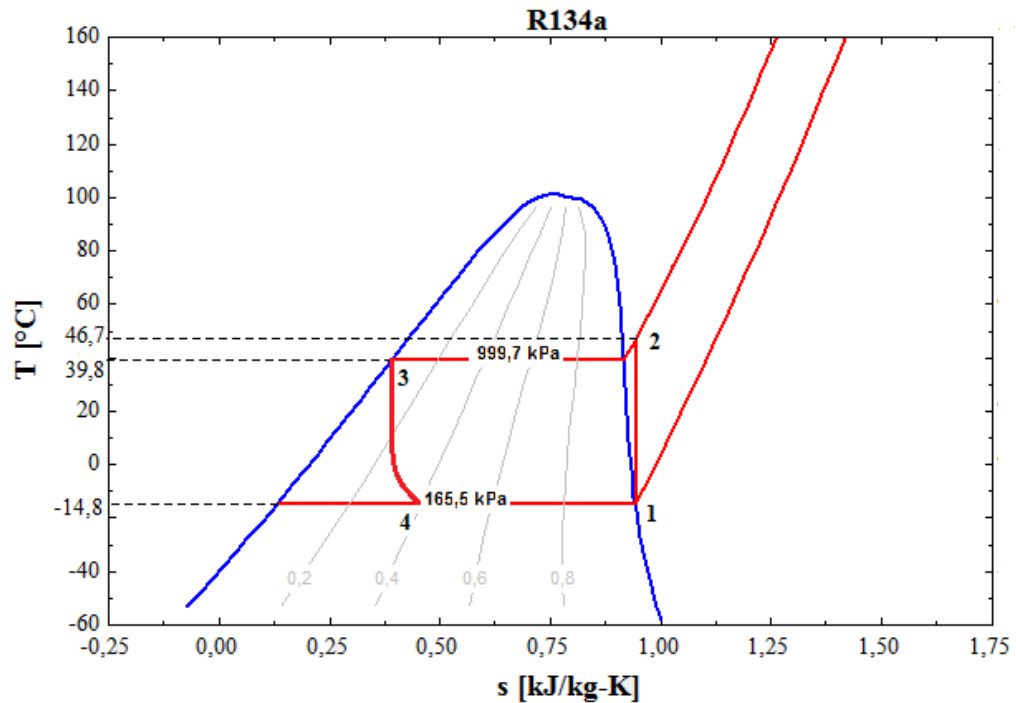
#### Datos:

$$P_1 = 165,47 \text{ [kPa]}$$

$$T_1 = 4,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$P_2 = 999,74 \text{ [kPa]}$$

$$T_2 = 55,3 \text{ [}^\circ\text{C]}$$



**Figura 2.8.** Diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor [102].

### 2.12.2. Vapor saturado y sobrecalentado (Proceso 1-2)

En este proceso se requiere el manejo de las tablas del refrigerante 134a [70, 71], y un proceso matemático de interpolación para obtener la entalpía, entropía y temperaturas en los cuatro estados.

Refrigerante 134a saturado. Tabla de presión

$P_1 = 165,47 \text{ [kPa]}$			
$P \text{ [kPa]}$	$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
160	-15,6	241,11	0,9419
165,474	$T_1$	$h_1$	$s_1$
180	-12,73	242,86	0,93965

$$T_1 = -14,81 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_1 = 241,58 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$s_1 = 0,94 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Refrigerante 134a sobrecalentado

$$s_1 = s_2 = 0,94 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$P = 0,9 \text{ [MPa]}$		
$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h_g \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
40	274,17	0,9327
$T_{2-1}$	$h_{2-1}$	0,94128
50	284,77	0,966

$$T_{2-1} = 42,57 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_{2-1} = 276,90 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$P = 1 \text{ [MPa]}$		
$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h_g \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
40	271,71	0,9179
$T_{2-2}$	$h_{2-2}$	0,94128
50	282,74	0,9525

$$h_{2-2} = 279,16 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$T_{2-2} = 46,75 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$P = 0,99973 \text{ [MPa]}$		
$P \text{ [MPa]}$	$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$
0,9	42,578	276,902
0,99973	$T_2$	$h_2$
1	46,758	279,165

$$T_2 = 46,74 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_2 = 279,15 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

### 2.12.3. Líquido saturado (Proceso 2-3)

En este proceso se requiere encontrar la entalpia y la temperatura en el **estado 3**, con el valor de la presión del **estado 2**, debido a que es un proceso a presión constante es decir un proceso isobárico.

$P_2 = P_3 = 999,74 \text{ [kPa]}$				(24)
$P \text{ [kPa]}$	$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	
950	37,48	104,51	0,38301	
999,740	$T_3$	$h_3$	$s_3$	
1000	39,37	107,32	0,39189	

$$T_3 = 39,36 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_3 = 107,30 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$s_3 = 0,39 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Una vez obtenida la entalpia del **estado 3**, se conoce que la entalpia del **estado 4** es igual a la entalpia del **estado 3**, debido a que es un proceso isoentálpico.

$$h_3 = h_4 = 107,30 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

#### 2.12.4. Calidad

Es el tanto por ciento de la masa de vapor en una mezcla líquido-vapor, que se lo calcula con las entalpias del **estado 4**, la entalpia en fase de líquido saturado y la entalpia en fase liquido-vapor.

$P = 165,474 \text{ [kPa]}$		
$P \text{ [kPa]}$	$h_f \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$h_{fg} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$
160	31,21	209,9
165,474	$T_2$	$h_2$
180	34,97	207,9

$$h_f = 32,24 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$h_{fg} = 209,35 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$x = \frac{h_4 - h_f}{h_{fg}} \quad (25)$$

$$x = \frac{107,305 - 32,239}{209,353}$$

$$x = 0,34$$

La calidad se da como  $x = 0,34$ , lo que representa 34 % de la masa que está en fase de vapor y 66 % se encuentra en fase líquida [70].

### 2.12.5. Transferencia de calor por unidad de masa de alta [ $Q_H$ ]

Es la magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de alta temperatura [70].

Se calcula con las entalpías del proceso (2-3)

$$Q_H = h_2 - h_3 \quad (26)$$

$$Q_H = 279,159 - 107,305$$

$$Q_H = 171,85 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

### 2.12.6. Transferencia de calor por unidad de masa de baja [ $Q_L$ ]

Es la magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de baja temperatura [70].

Se calcula con las entalpías del proceso (4-1)

$$Q_L = h_1 - h_4 \quad (27)$$

$$Q_L = 241,589 - 107,305$$

$$Q_L = 134,284 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

### 2.12.7. Trabajo neto consumido

Es el trabajo realizado sobre el sistema.

$$W_{neto.} = q_H - q_L \quad (28)$$

$$W_{neto.} = 171,853 - 134,284$$

$$W_{neto.} = 37,57 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

### 2.12.8. Coeficiente de desempeño de bomba de calor en un ciclo ideal

Para el cálculo del  $COP_{BC}$ , se requiere los valores del  $Q_H$  y el  $W_{neto}$ .

$$COP_{BC} = \frac{Q_H}{W_{neto}} \quad (29)$$

$$COP_{BC} = \frac{171,853}{37,57}$$

$$COP_{BC} = 4,574$$

### 2.12.9. Coeficiente de desempeño de refrigeración en un ciclo ideal

Para el cálculo del  $COP_R$ , se requiere los valores del  $Q_L$  y el  $W_{neto}$ .

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{neto}} \quad (30)$$

$$COP_R = \frac{134,28}{37,57}$$

$$COP_R = 3,57$$

### 2.12.10. Análisis matemático del ciclo real de la bomba de calor

Se considera la bomba de calor corregida que utiliza Refrigerante 134a como fluido de trabajo que opera en un ciclo real de refrigeración por compresión de vapor. Los datos que se requiere obtener para la investigación son:

- Transferencia de calor por unidad de masa de baja
- Transferencia de calor por unidad de masa de alta
- Trabajo neto consumido
- Calidad
- $COP_{BC}$  Y  $COP_{Ref}$

Conocido los datos de las presiones y temperaturas de la bomba de calor, se verifican mediante tablas dinámicas en Microsoft Excel para constatar que cumplan el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor. También se desarrolla un ejercicio con los datos tomados de una de las pruebas para verificar que las adecuaciones que se hicieron a la bomba de calor estén bien, además se realizará un diagrama T-s como se muestra en la Figura 2.9.

**Datos:**

$$P_1 = 165,474 \text{ [kPa]}$$

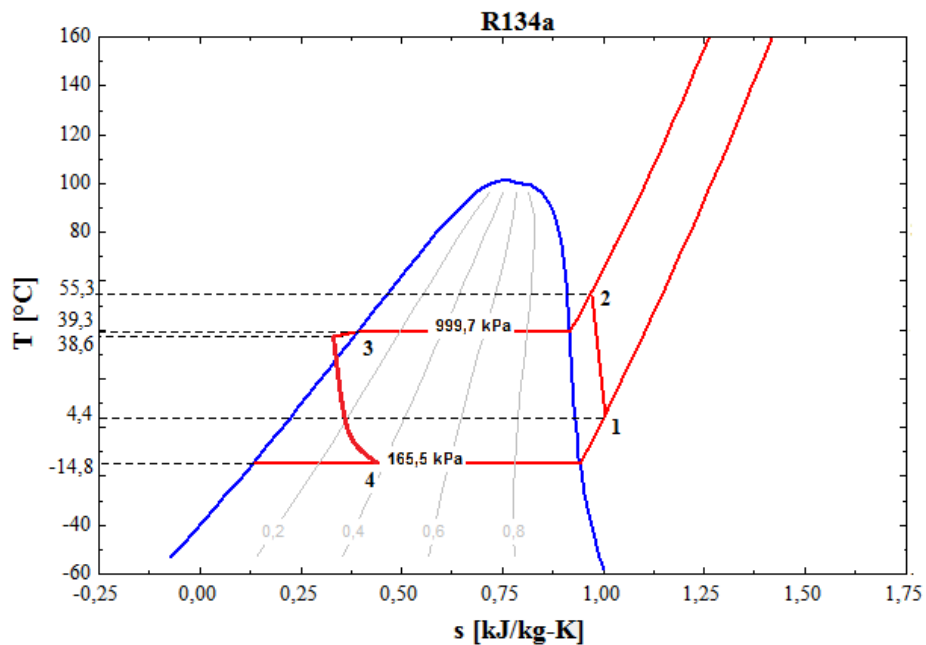
$$T_1 = 4,4 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$T_{sat} = -14,81 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$P_2 = 999,74 \text{ [kPa]}$$

$$T_2 = 55,3 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$T_{sat} = 39,35 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$



**Figura 2.9.** Diagrama T-s para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor

#### 2.12.11. Vapor Saturado y Sobrecalentado (Proceso 1-2)

En este proceso se requiere el manejo de las tablas del refrigerante 134a [70, 71], y un proceso matemático de interpolación para obtener la entalpía, entropía y temperaturas en los cuatro estados.



Refrigerante 134a sobrecalentado

$$P_1 = 0,16547 \text{ [MPa]}$$

$P = 0,14 \text{ [MPa]}$		
$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
0	254,6	1,0031
4,4	$h_{1-1}$	$s_{1-1}$
10	262,93	1,0331

$$s_{1-1} = 1,01 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$h_{1-1} = 258,26 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$P = 0,18 \text{ [MPa]}$		
$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
0	253,58	0,9798
4,4	$h_{1-2}$	$s_{1-2}$
10	262,04	1,0102

$$s_{1-2} = 0,99 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$h_{1-2} = 257,30 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$P = 0,16547 \text{ [MPa]}$		
$P \text{ [MPa]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
0,14	258,265	1,01630
0,16547	$h_1$	$s_1$
0,18	257,302	0,99318

$$s_1 = 1,00 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$h_1 = 257,65 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Refrigerante 134a sobrecalentado

$$P_2 = 0,99 \text{ [MPa]}$$

$P = 0,9 \text{ [MPa]}$		
$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
50	284,77	0,966
55,3	$h_{2-1}$	$s_{2-1}$
60	295,13	0,9976

$$s_{2-1} = 0,98 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$h_{2-1} = 290,26 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$P = 1 \text{ [MPa]}$		
$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$h \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
50	282,74	0,9525
55,3	$h_{2-2}$	$s_{2-2}$
60	293,38	0,985

$$s_{1-2} = 0,96 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

$$h_{1-2} = 288,37 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$P_2 = 0,99974 \text{ [MPa]}$		
$P \text{ [MPa]}$	$h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	$s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$
0.9	290,261	0,98275
0,99974	$h_2$	$s_2$
1	288,379	0,96973

$$h_2 = 288,38 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$s_2 = 0,96 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

### 2.12.12. Líquido saturado

En este proceso se requiere encontrar la entalpia y la entropía con la temperatura del (*estado 3*).

$T_3 = 38,6 \text{ [°C]}$		
$T \text{ [°C]}$	$h \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	$s \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$
38	105,29	0,38548
38,6	$h_3$	$s_3$
40	108,26	0,39486

$$h_3 = 106,18 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$s_3 = 0,38 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

Obtenido la entalpia del **estado 3**, se conoce que la entalpia del **estado 4** es igual a la entalpia del **estado 3** por un proceso isoentálpico.

$$h_3 = h_4 = 106,18 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

### 2.12.13. Calidad

Es el tanto por ciento de la masa de vapor en una mezcla líquido-vapor, que se lo calcula con la presión 1, la entalpia en fase de líquido saturado y la entalpia en fase liquido-vapor.

$P_1 = 165,474 \text{ [kPa]}$		
$P \text{ [kPa]}$	$h_f \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$	$h_{fg} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$
160	31,21	209,9
165,474	$h_f$	$h_{fg}$
180	34,97	207,9

$$h_f = 32,23 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$f_{fg} = 209,35 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$x = \frac{h_4 - h_f}{h_{fg}} \quad (31)$$

$$x = \frac{106,181 - 32,239}{209,353}$$

$$x = 0,35$$

La calidad se da como  $x = 0,35$ , lo que representa 35 % de la masa que está en fase de vapor y 65 % se encuentra en fase líquida [70].

#### 2.12.14. Transferencia de calor por unidad de masa de alta [ $Q_H$ ]

Es la magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de alta temperatura [70].

Se calcula con las entalpías del proceso (2-3)

$$Q_H = h_2 - h_3 \quad (32)$$

$$Q_H = 288,384 - 106,181$$

$$Q_H = 182,20 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

#### 2.12.15. Transferencia de calor por unidad de masa de baja [ $Q_L$ ]

Es la magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de baja temperatura [70].

Se calcula con las entalpías del proceso (4-1)

$$Q_L = h_1 - h_4 \quad (33)$$

$$Q_L = 257,652 - 106,181$$

$$Q_L = 151,47 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

#### 2.12.16. Trabajo neto consumido

Es el trabajo realizado sobre el sistema.

$$W_{neto} = Q_H - Q_L \quad (34)$$

$$W_{neto} = 182,203 - 151,471$$

$$W_{neto} = 30,73 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

### 2.12.17. Coeficiente de desempeño de la bomba de calor del ciclo real

Para el cálculo del  $COP_{BC}$ , se requiere los valores del  $Q_H$  y el  $W_{neto}$

$$COP_{BC} = \frac{Q_H}{W_{neto}} \quad (35)$$

$$COP_{BC} = \frac{182,20}{30,732}$$

$$COP_{BC} = 5,93$$

### 2.12.18. Coeficiente de desempeño de refrigeración del ciclo real

Para el cálculo del  $COP_{Ref}$ , se requiere los valores del  $Q_L$  y el  $W_{neto}$

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{neto}} \quad (36)$$

$$COP_R = \frac{151,471}{30,732}$$

$$COP_R = 4,93$$

Realizado los cálculos del ciclo ideal y ciclo real, con los datos de una de las pruebas de funcionamiento de la bomba de calor, se presenta una tabla de resultados que necesita cada ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

Se concluye que los cálculos realizados para la implementación de un sistema solar fotovoltaico, fueron referenciados de varios artículos científicos y libros, los más relevantes son Aparicio [94] y Gonzáles [95], dando como resultado un cálculo exacto de todos los instrumentos que se requieren para poner en marcha un sistema de energía renovable.

Los cuatro equipos de laboratorio pueden funcionar con normalidad conectados al sistema solar fotovoltaico, teniendo en cuenta que el sistema puede encender 2 equipos

simultáneamente sin ningún problema, porque el dimensionamiento realizado para la bomba de calor, es lo suficientemente sustentable para estos equipos, las combinaciones que se pueden conectarse son “Reaction Turbine & Pelton Turbine”, “Parallel Pumps & Centrifugal Pump”, “Reaction Turbine & Parallel Pumps “, “Pelton Turbine & Centrifugal Pump”, “Reaction Turbine & Centrifugal Pump” y “Pelton Turbine & Parallel Pumps”, pero sin estar conectada la bomba de calor.

### CAPÍTULO III


#### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS

El capítulo se desarrolla en base a la realización de pruebas y análisis del funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico en diferentes condiciones climatológicas y del desempeño del compresor de la bomba de calor; a través de dos tipos de suministro de corriente eléctrica, tales como los generados por fuentes no renovables y por el sistema solar fotovoltaico autónomo. Además, se procede el análisis de costos del proyecto de investigación.

#### 3.1. Instrumentos de control

Los instrumentos que se implementaron en la recopilación de datos se describirán a continuación en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Nómina de instrumentos de medición.

Equipo	Grafico	Descripción
Ambient Weather WS- 1200		La estación meteorológica WS-1200 transmite mediciones y rangos de la temperatura exterior que va desde los - 40 a 65 (°C), la humedad de 1 - 99 %, la velocidad del viento de 0 – 44,7 (m/s), la dirección del viento de 0 – 360°, y la radiación solar de 0 – 400000 Lux [103].
Infrared Thermometer CA879		El termómetro infrarrojo es un instrumento de medicación sin contacto, que ofrece un rango de temperatura de -58 a 550 (°C), una exactitud de lectura de $\pm 5$ y un láser de 1 (mW) [104].



Continuación Tabla 3.1

Cámara  
infrarroja Fluke  
Ti200



La cámara termográfica Fluke Ti200 es rápida, precisa y fácil de utilizar, esta cámara es perfecta para inspecciones infrarrojas, tiene un sistema de enfoque automático, funciona a temperaturas de -10 a 50 (°C), trabaja en la humedad relativa del 10 – 95 % y funciona hasta alturas de 2000 m [105].

Controlador de  
temperatura  
MT-512e 2HP



El MT-512e-2HP puede realizar deshielos periódicos por cada parada del compresor, tiene un sistema de alimentación de corriente de 115 – 230 (V), puede controlar temperaturas desde -50 a 105 (°C), trabaja con una humedad de operación del 10 – 90 %, soporta una potencia máxima de la caga de 2 HP y funciona también como un indicador de temperatura [106].

### 3.2. Ensayos

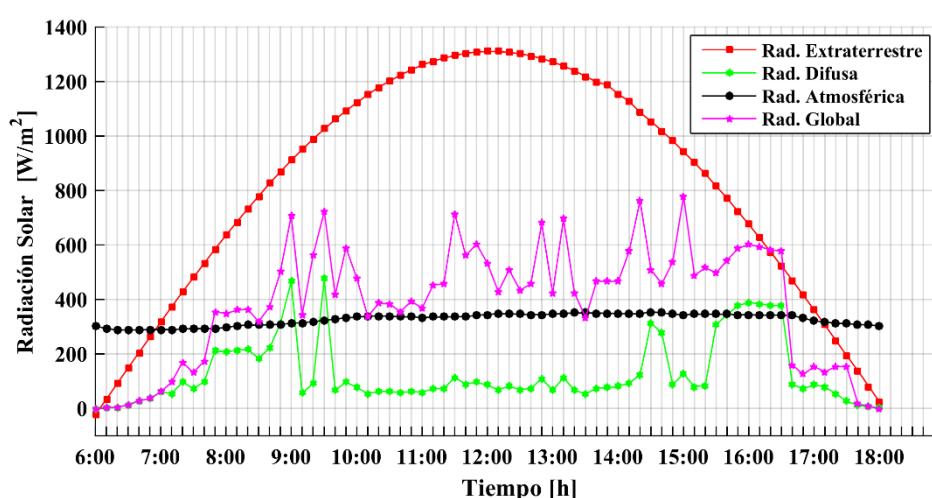
Para los ensayos de funcionamiento de la bomba de calor, se realizó 2 procesos de encendido, una con la corriente eléctrica de la red interconectada nacional y la otra con la energía eléctrica generada por el sistema solar fotovoltaico con un lineamiento de prueba el cual consiste en alcanzar una temperatura máxima de 50 °C dentro del condensador. Para el análisis de este comportamiento se estableció un intervalo de 2 minutos entre cada toma de datos. Los valores más relevantes de los ensayos se muestran a continuación en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Datos relevantes de las pruebas.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9	Prueba 10	Prueba 11	Prueba 12	Prueba 13	Prueba 14
Condición Climática	Nublado	Nublado	Nublado	Nublado	Nublado	Nublado	Despejado	Nublado	Despejado	Despejado	Despejado	Nublado	Nublado	Nublado
Rad. Mín [ $W \cdot m^{-2}$ ]	257,6	166,6	219	227,4	515,3	454,6	455,8	198,9	582,6	747,7	836,4	889,8	704,7	219
Rad. Máx [ $W \cdot m^{-2}$ ]	2556	1331	1942	6209	3478	3656	4814	2314	5491	3439	7238	7735	5045	1942
Vol. Bat. [ $V$ ]	13,5	13	12,9	13,1	13,5	13,4	13	13	13,1	13,2	13,5	12,9	13	13,5
T. Ambiente [ $^{\circ}C$ ]	17,4	19,9	18,7	19,5	17,8	21,2	21,7	18,6	20,7	23,3	24,6	18,5	18,3	18,7
T. Máx del Agua [ $^{\circ}C$ ]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

### 3.3. Datos de la radiación

Estos datos se recopilaron el 26 de abril del presente año, en el sector de Pomasqui, con los parámetros de 6:00 am de la mañana a 18:00 pm de la tarde, para obtener los valores de la radiación extraterrestre, radiación difusa, radiación atmosférica y radiación global, teniendo en cuenta que ese mes es de constantes lluvias y de baja radiación; sirve para verificar el funcionamiento tanto de los paneles solares fotovoltaicos como de la bomba de calor, sometidos a condiciones críticas de radiación solar. A continuación, se muestra en la Figura 3.1 la variación de la radiación solar.



**Figura 3.1.** Variación de la radiación solar (26-abril-2018)

Posteriormente en la Tabla 3.3, se indica los valores y componentes más relevantes de la Figura 3.1.

**Tabla 3.3.** Datos relevantes de la radiación solar.

Ubicación	Tiempo	Radiación	Descripción
Quito-Pomasqui	[h]	[W · m <sup>-2</sup> ]	
	6:00	-23,14	
Radiación	9:00	910,70	Estos valores representan la cantidad de radiación que recibió la capa superior de la atmósfera en el lugar que se llevaron a cabo las pruebas.
Extraterrestre	12:00	1310,93	
	15:00	943,07	
	18:00	22,63	

Radiación Difusa	9:00	465,11	Los valores que se seleccionaron representan los picos más altos de la radiación difusa en el lugar de las pruebas, los cuales ayudan al funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos.
	9:30	475,38	
	16:00	388,81	
	16:10	384,28	
Radiación Atmosférica	14:30	354,77	Se establece a partir de la variación de la temperatura con respecto al tiempo, como se muestra en los 4 datos.
	13:30	351,19	
	14:40	350,47	
	13:40	349,76	
Radiación Global	15:00	779,23	Son los máximos valores de radiación que se presentaron en el día de las pruebas.
	14:20	763,12	
	9:30	723,27	
	11:30	714,63	

### 3.4. Datos de la temperatura ambiente

La temperatura ambiente influye directamente en el funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos y en la bomba de calor. Estos valores varían de acuerdo a las condiciones climatológicas que se presentaron en los días de pruebas. A continuación, en la Figura 3.2 se ilustran los resultados de las pruebas.

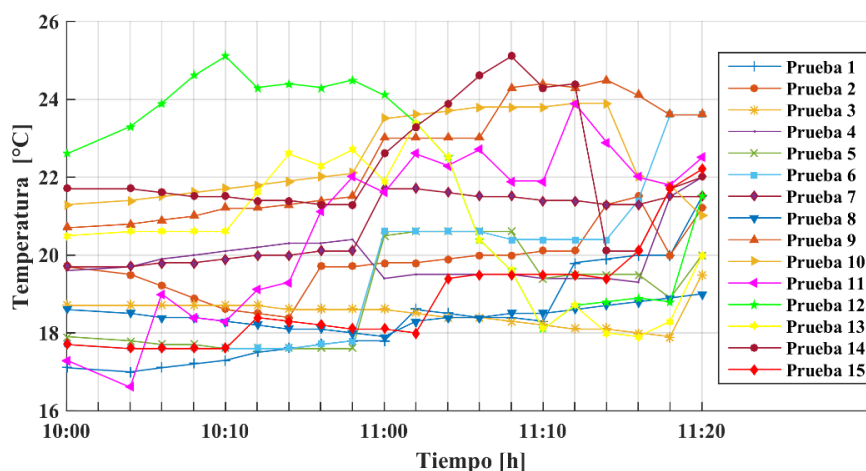


Figura 3.2. Temperatura ambiente

Cada prueba tiene diferentes valores de temperatura, debido a los intervalos de tiempo en los cuales fueron realizadas. En la Tabla 3.4 se indica el valor inicial, final y el más alto de cada prueba.

**Tabla 3.4.** Valores de la temperatura ambiente.

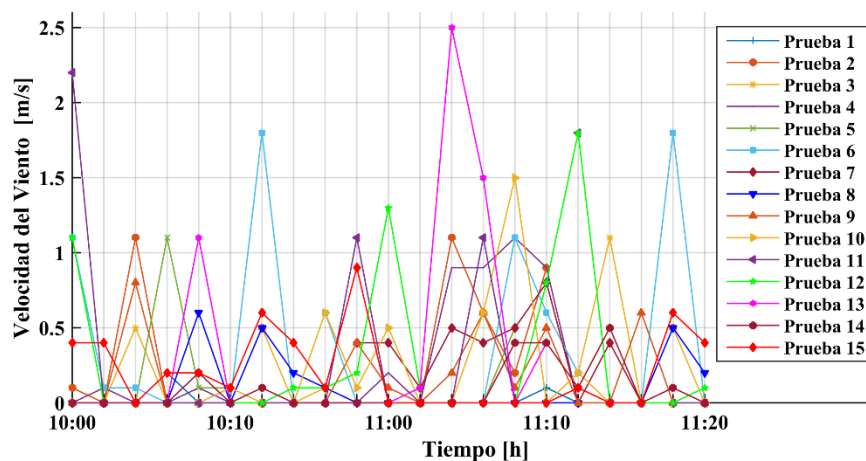
<b>Ubicación</b>		<b>Tiempo</b>	<b>Temperatura</b>
<b>Quito - Pomasqui</b>		<b>[h]</b>	<b>Ambiente [°C]</b>
Prueba 1	Valor inicial	10:00	17,1
	Valor Final	11:20	21,5
	Valor más alto	11:20	21,5
Prueba 2	Valor inicial	10:00	19,7
	Valor Final	11:20	21,2
	Valor más alto	11:16	21,5
Prueba 3	Valor inicial	10:00	18,7
	Valor Final	11:20	19,5
	Valor más alto	11:20	19,5
Prueba 4	Valor inicial	10:00	19,6
	Valor Final	11:20	22
	Valor más alto	11:20	22
Prueba 5	Valor inicial	10:00	17,9
	Valor Final	11:20	20
	Valor más alto	11:00	20,6
Prueba 6	Valor inicial	10:00	17,7
	Valor Final	11:20	23,6
	Valor más alto	11:18	23,6
Prueba 7	Valor inicial	10:00	19,7
	Valor Final	11:20	21,5
	Valor más alto	11:00	21,7
Prueba 8	Valor inicial	10:00	18,6
	Valor Final	11:20	19

Continuación Tabla 3.5.

	Valor más alto	11:20	19
	Valor inicial	10:00	20,7
Prueba 9	Valor Final	11:20	23,6
	Valor más alto	11:14	24,5
	Valor inicial	10:00	21,3
Prueba 10	Valor Final	11:20	21
	Valor más alto	11:12	23,9
	Valor inicial	10:00	17,3
Prueba 11	Valor Final	11:20	22,5
	Valor más alto	11:12	23,9
	Valor inicial	10:00	22,6
Prueba 12	Valor Final	11:20	21,5
	Valor más alto	10:10	25,1
	Valor inicial	10:00	20,5
Prueba 13	Valor Final	11:20	20
	Valor más alto	10:18	22,7
	Valor inicial	10:00	21,7
Prueba 14	Valor Final	11:20	22
	Valor más alto	11:08	21,5
	Valor inicial	10:00	17,7
Prueba 15	Valor Final	11:20	22,2
	Valor más alto	11:20	22,2

### 3.5. Datos de la velocidad del viento

La velocidad del viento es el elemento primordial para el enfriamiento y la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos y del compresor de la bomba de calor. En la Figura 3.3 se indican los datos obtenidos en las pruebas.



**Figura 3.3.** Velocidad del viento.

Los valores de la Figura 3.3, fluctúan en una razón de  $0 - 2.5 [m \cdot s^{-1}]$  con respecto al tiempo que se demora las pruebas. A continuación, en la Tabla 3.5 se indica el valor máximo y mínimo de la velocidad del viento de cada prueba.

**Tabla 3.5.** Valores de la velocidad del viento.

Ubicación Quito - Pomasqui	Tiempo [h]	Velocidad del Viento [ $m \cdot s^{-1}$ ]
<b>Prueba 1</b>	10:00	0
	10:06	0,2
<b>Prueba 2</b>	10:00	0
	11:02	1,1
<b>Prueba 3</b>	10:00	0
	11:08	1,1
<b>Prueba 4</b>	10:00	0
	11:08	1,1
<b>Prueba 5</b>	10:00	0
	10:08	1,1
<b>Prueba 6</b>	10:06	0
	11:14	1,8
<b>Prueba 7</b>	10:00	0
	11:10	0,8
<b>Prueba 8</b>	10:00	0
	10:08	0,6
<b>Prueba 9</b>	10:00	0
	10:04	0,8
<b>Prueba 10</b>	10:00	0
	11:08	1,5

Continuación Tabla 3.5

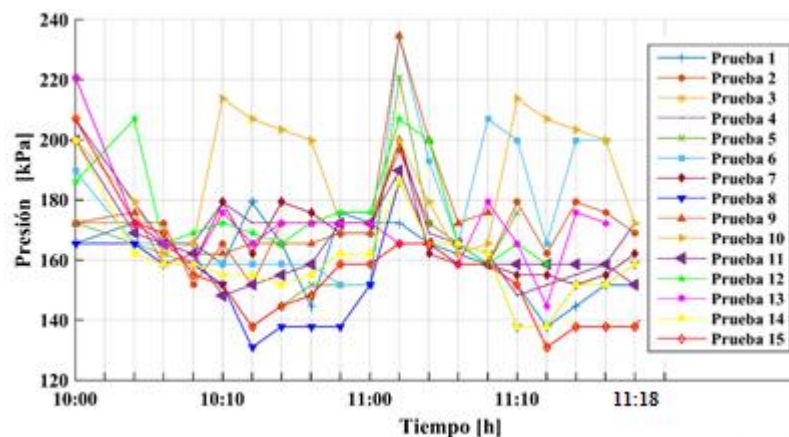
<b>Prueba 11</b>	10:02	0
	10:00	2,2
<b>Prueba 12</b>	10:02	0
	11:04	2,5
<b>Prueba 13</b>	10:00	0
	11:04	2,5
<b>Prueba 14</b>	10:00	0
	11:14	0,5
<b>Prueba 15</b>	10:04	0
	10:18	0,9

### 3.6. Datos de las pruebas realizadas a la bomba de calor

La bomba de calor cuenta con un compresor de velocidad fija, trabaja con refrigerante 134a; requiere al ingreso una presión y temperatura de baja, para luego convertirla mediante el proceso mecánico de compresión en presión y temperatura de alta. A continuación, se indican todos los resultados de las pruebas, las cuales cumplen con los ciclos termodinámicos, estas fueron recopiladas en las dos encendidas que se realizaron, la primera inicio a las 10:00 am hasta las 10:18 am y la segunda a las 11:00 am hasta las 11:18 am.

#### 3.6.1. Presión de entrada

Los valores que se muestran en la Figura 3.4, son de la bomba de calor cuando el compresor está funcionando en los intervalos de tiempos establecidos; estos valores son las presiones de baja que necesita el compresor para su trabajo, como bien se sabe el compresor trabaja con vapor sobrecalentado (refrigerante 134a).



**Figura 3.4.** Presión de entrada al compresor



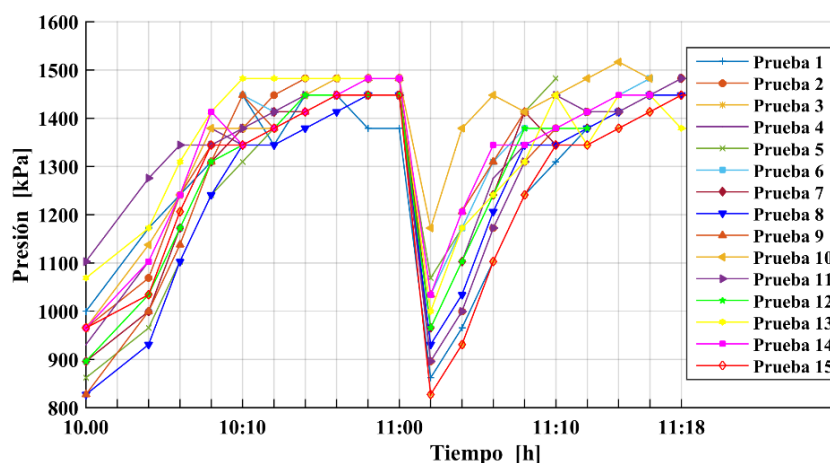
En la Figura 3.4 se aprecia dos tramos, los cuales representan el encendido y apagado de la bomba de calor por dos ocasiones; en la Tabla 3.6 se explica detalladamente cada encendido con la prueba más importante de la presión de entrada al compresor.

**Tabla 3.6.** Valor de la presión de entrada al compresor.

Ubicación			
Quito - Pomasqui			
Encendido 1		Descripción	
Prueba 7	Tiempo	Presión inicial	La prueba 7, tuvo un comportamiento notorio a las otras pruebas en los dos encendidos, la presión decreció con respecto al tiempo y a la variación de la temperatura del evaporador.
	[h]	[kPa]	
	10:00	220,632	
		Presión final	
		[kPa]	
	10:18	168,922	
		Encendido 2	
	Tiempo	Presión inicial	
	[h]	[kPa]	
	11:00	199,948	
		Presión final	
		[kPa]	
	11:18	162,027	

### 3.6.2. Presión de salida

Los valores que se muestran en la Figura 3.5, son de la bomba de calor cuando el compresor está funcionando en los intervalos de tiempos establecidos anteriormente; cada uno de estos valores representa las presiones de alta que produce el compresor en su trabajo y son apreciadas mediante el manómetro instalado a la salida del compresor.



**Figura 3.5.** Presión de salida del compresor

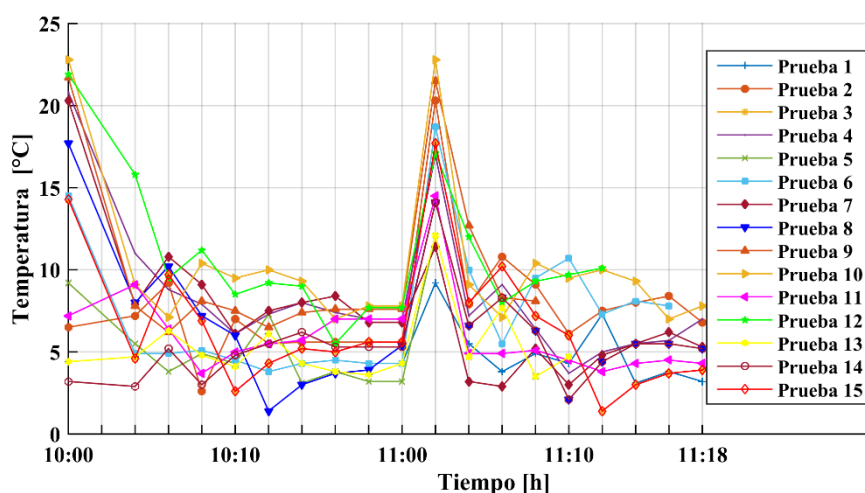
En la Figura 3.5 se observa el encendido y apagado de la bomba de calor por dos ocasiones; en la Tabla 3.7 se explica el ensayo con la prueba más importante de la presión de salida del compresor.

**Tabla 3.7.** Valor de la presión de salida del compresor.

Ubicación			
Quito - Pomasqui			
Encendido 1		Descripción	
Tiempo	Presión inicial		
[h]	[kPa]		
10:00	827,371		
	Presión final	La prueba 8, resalto de las demás debido a condiciones climatológicas diferentes, por lo cual la presión fue aumentando con respecto al tiempo y al trabajo que realizo el compresor.	
	[kPa]		
10:18	1447,899		
<b>Prueba 8</b>			
Encendido 2			
Tiempo	Presión inicial		
[h]	[kPa]		
11:00	930,792		
	Presión final		
	[kPa]		
11:18	1447,899		

### 3.6.3. Temperatura de entrada al compresor

Estos valores sirven para verificar si la bomba de calor está cumpliendo el ciclo de refrigeración y controlar el estado del compresor. En la Figura 3.6 se muestra las diversas variaciones de temperaturas de baja que se produce en el evaporador.



**Figura 3.6.** Temperatura de entrada al compresor.

En la Figura 3.6 es notable la variación de la temperatura de entrada al compresor, por los diversos factores que influyen en el funcionamiento de la bomba de calor, tales como la radiación solar, el rendimiento del compresor y del evaporador. En la gráfica se observa dos tramos, los cuales simbolizan el encendido y apagado del equipo; por lo tanto, en la Tabla 3.8 se explica con una prueba la variación de la temperatura de la entrada al compresor.

**Tabla 3.8.** Variación de la temperatura de entrada al compresor.

Ubicación		
Quito - Pomasqui		
Tramo 1		Descripción
Tiempo	Temperatura inicial	
[h]	[°C]	
<b>Prueba 7</b>	10:00	20,3

	Temperatura final	Se escogió la prueba 7, para observar a la temperatura descender con el transcurso del tiempo y la variación de presión que ingresa al compresor por el vapor sobrecalentado del refrigerante 134a.
	[°C]	
10:18	6,8	
<b>Tramo 2</b>		
Tiempo	Temperatura inicial	
[h]	[°C]	
11:00	11,4	
	Temperatura final	
	[°C]	
11:18	5,3	

3.6.4. Temperatura de salida del compresor

Los valores que se muestran en la Figura 3.7, son recopilados cuando la bomba de calor se encuentra en funcionamiento; cada uno de estos valores representa las temperaturas de alta que produce el compresor en su trabajo.

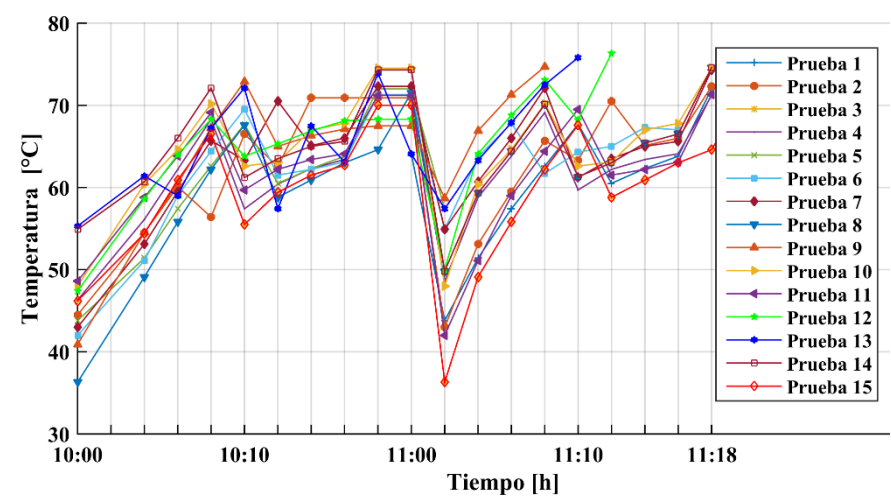


Figura 3.7. Temperatura de salida del compresor

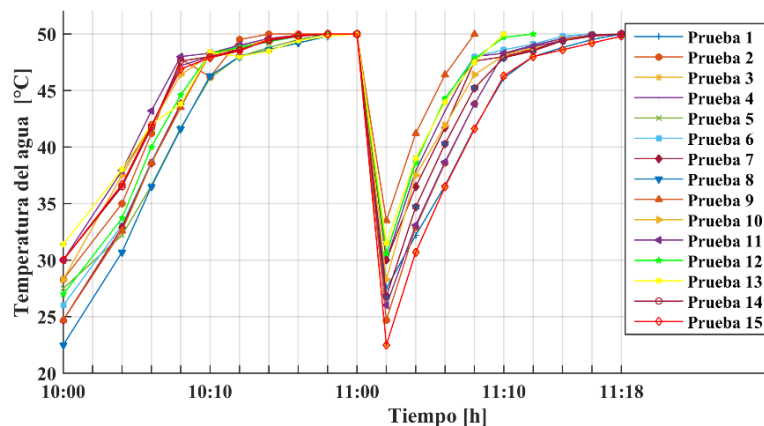
En la Figura 3.7 se observa una importante variación de la temperatura de salida del compresor, por diferentes agentes externos como internos de la bomba de calor. En la gráfica se aprecia dos ensayos, los cuales representan el encendido y apagado del equipo; en la Tabla 3.9 se explica con una prueba la variación de la temperatura de salida del compresor.

**Tabla 3.9.** Variación de la temperatura de salida del compresor.

Ubicación			
Quito - Pomasqui			
Encendido 1		Descripción	
Tiempo	Temperatura inicial		
[h]	[°C]		
10:00	36,3		
	Temperatura final	Esta prueba muestra como la temperatura aumenta y cambia la presión con el transcurso del tiempo y la variación de presión que genera el compresor en su proceso mecánico para comprimir todo el vapor sobrecalentado del refrigerante 134a.	
	[°C]		
10:18	64,6		
<b>Prueba 8</b>			
	<b>Encendido 2</b>		
Tiempo	Temperatura inicial		
[h]	[°C]		
11:00	49,8		
	Temperatura final		
	[°C]		
11:18	74,6		

### 3.7. Datos de la temperatura del agua

El procedimiento para la obtención de agua caliente empieza con el llenado de agua fría en los tanques de la bomba de calor, a una temperatura promedio de 20 °C; la capacidad de la bomba de calor, para calentar el agua puede alcanzar hasta 57 °C, sin embargo, se definió a una temperatura límite de 50 °C que se programó en los nuevos controladores de temperatura digitales que cuenta la bomba de calor. Una vez obtenida la temperatura deseada se apaga el equipo y se procede a evacuar el agua de los tanques, para posteriormente llenarlos nuevamente con agua fría y repetir el proceso. En la Figura 3.8 se muestra el aumento de temperatura del agua, en el condensador.



**Figura 3.8.** Temperatura del agua en el condensador.

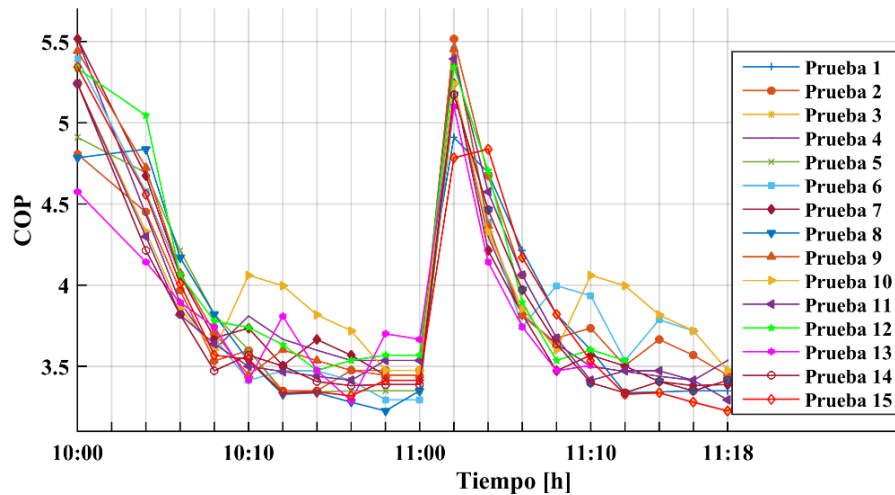
En la Figura 3.8 se observa como la temperatura del agua inicia con la temperatura ambiental de cada prueba y va aumentando por diferentes agentes externos como internos de la bomba de calor (radiación solar – refrigerante 134a) respectivamente. En la gráfica se observa dos tramos, los cuales representan el encendido y apagado del equipo en dos instancias; por lo cual, en la Tabla 3.10 se explica con una prueba representativa la variación de la temperatura del agua en el condensador.

**Tabla 3.10.** Variación de la temperatura del agua en el condensador.

Ubicación		
Quito - Pomasqui		
Encendido 1		Descripción
Tiempo	Temperatura inicial	La prueba seleccionada muestra como la temperatura del agua dentro del condensador aumenta paulatinamente con el transcurso del tiempo, la variación presión y la radiación solar.
[h]	[°C]	
10:00	24,7	
	Temperatura final	
	[°C]	
10:18	50	
<b>Prueba 8</b>	<b>Encendido 2</b>	
Tiempo	Temperatura inicial	
[h]	[°C]	
11:00	30	
	Temperatura final	
	[°C]	
11:18	50	

### 3.8. Datos del rendimiento del compresor

El coeficiente de desempeño (COP) se basa en la cantidad de calor cedido al medio, con respecto a la cantidad de entrada que se demanda para realizar el trabajo. En las Figuras 3.9, se muestra el coeficiente de desempeño (COP), analizado desde el punto de vista de un ciclo ideal.



**Figura 3.9.** Coeficiente de desempeño ( $COP_{BC}$ ) del ciclo ideal.

En la Figura 3.9 se observa como el coeficiente de rendimiento va descendiendo de acuerdo al tiempo que se encuentra encendida la bomba de calor, hasta alcanzar a un rango estable. También se aprecia dos tramos, los cuales representan el encendido y apagado del equipo; en la Tabla 3.11 se explica con una prueba representativa la variación del coeficiente de rendimiento del ciclo de la bomba de calor.

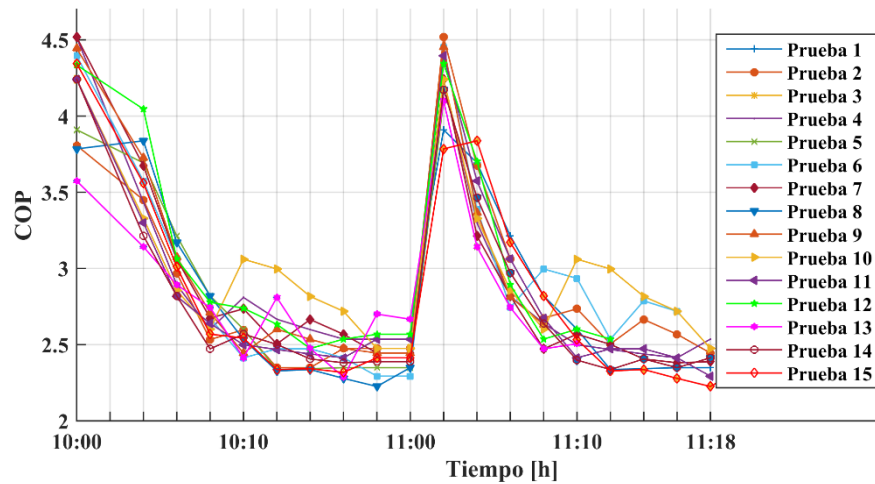
**Tabla 3.11.** Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_{BC}$ ) del ciclo ideal

Ubicación		
Quito - Pomasqui		
Encendido 1		Descripción
Tiempo	COP inicial	
[h]		
<b>Prueba 7</b>	10:00	5,52
		COP final
	10:18	3,44

Continuación Tabla 3.11

<b>Encendido 2</b>		Se eligió esta prueba, porque
Tiempo	COP inicial	muestra como el coeficiente
[h]		de rendimiento desciende en el
11:00	5,24	lapso establecido.
	COP final	
11:18	3,39	

En la Figura 3.10 se muestra el coeficiente de desempeño ( $COP_R$ ) del ciclo de refrigeración.



**Figura 3.10.** Coeficiente de desempeño ( $COP_R$ ) del ciclo ideal

En la Tabla 3.12 se explica con una prueba representativa la variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_R$ ) del ciclo de refrigeración.

**Tabla 3.12.** Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_R$ ) del ciclo ideal

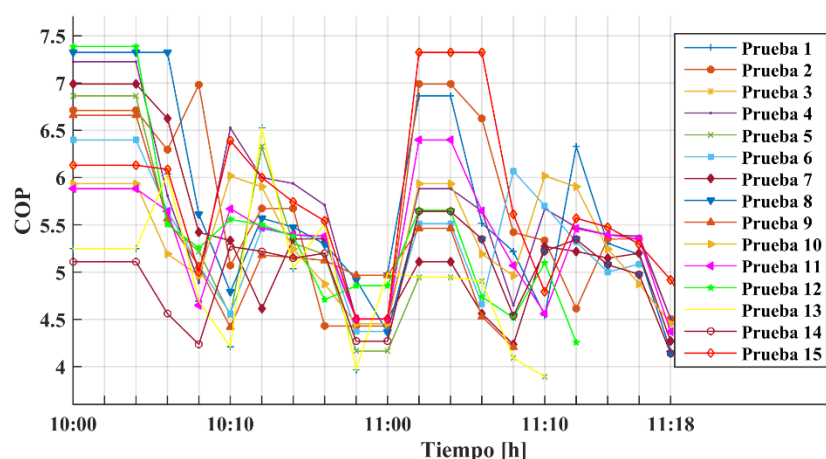
Ubicación	
Quito - Pomasqui	
Encendido 1	Descripción
Tiempo	COP inicial
<b>Prueba 7</b> [h]	
10:00	4,52



Continuación Tabla 3.12

	COP final	Se seleccionó la prueba 7,
10:18	2,45	porque mostró un
<b>Encendido 2</b>		decrecimiento del coeficiente
Tiempo	COP inicial	de rendimiento en el lapso de
[h]		tiempo establecido y por el
11:00	4,24	excelente funcionamiento del
	COP final	compresor.
11:18	2,39	

Al coeficiente de desempeño (COP), también se lo debe analizar a partir del ciclo real, como se muestra a continuación en las Figuras 3.11



**Figura 3.11.** Coeficiente de desempeño ( $COP_{BC}$ ) del ciclo real

En la Tabla 3.13 se explica con una prueba representativa la variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_{BC}$ ) del ciclo real de la bomba de calor.

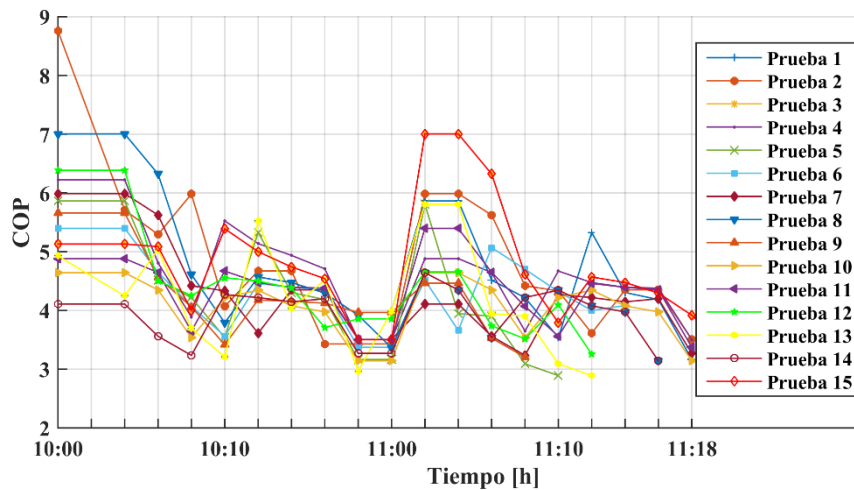
**Tabla 3.13.** Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_{BC}$ ) del ciclo real.

Ubicación	
Quito - Pomasqui	
Encendido 1	Descripción
Tiempo	COP inicial
[h]	
<b>Prueba 7</b>	
10:00	6,99

Continuación Tabla 3.13

	COP final	La prueba escogida muestra
10:18	4,51	como en realidad está
<b>Encendido 2</b>		
Tiempo	COP inicial	funcionando la bomba de
[h]		calor, a partir del coeficiente
		de rendimiento del ciclo real.
11:00	5,11	
	COP final	
11:18	4,27	

En la Figura 3.12 se muestra el coeficiente de desempeño ( $COP_R$ ) del ciclo real de la bomba de calor.



**Figura 3.12.** Coeficiente de desempeño ( $COP_R$ ) del ciclo real

En la Tabla 3.14 se explica con una prueba representativa la variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_R$ ) del ciclo real de la bomba de calor.

**Tabla 3.14.** Variación del coeficiente de rendimiento ( $COP_R$ ) del ciclo real

Ubicación		
Quito - Pomasqui		
	Tramo 1	Descripción
<b>Prueba 7</b>	Tiempo	COP inicial
	[h]	
	10:00	5,99

Continuación Tabla 3.14

	COP final	Los datos de la prueba 8, fueron tomados a partir del coeficiente de rendimiento del ciclo real, porque muestra cómo está funcionando la bomba de calor.
10:18	3,51	
<b>Tramo 2</b>		
Tiempo	COP inicial	
[h]		
11:00	4,11	
	COP final	
11:18	3,27	

---

Los ensayos que se realizaron a la bomba de calor ayudan a identificar ciertas variaciones que tiene el equipo cuando se somete a diversas condiciones climáticas y de fuentes de energía eléctrica diferente a la utilizada, por lo cual la bomba de calor, aunque se encuentre en condiciones no favorables, esta puede calentar el agua debido a las propiedades del refrigerante 134a.

Se puede considerar, también ciertas condiciones que favorecen al proceso de calentamiento más rápido, como son los niveles altos de radiación y de temperatura ambiente.

### 3.9. Análisis económico

Corresponde al sistema solar fotovoltaico y a la bomba de calor reconstruida. Se especifica los valores de los equipos obtenidos, la materia prima y la mano de obra requerida para el ensamble y reconstrucción.

#### 3.9.1. Lista de insumos y equipos

Se describe en dos tablas debido a que se adquirió el sistema solar fotovoltaico y la reconstrucción de la bomba de calor.

En la Tabla 3.15 se muestra los insumos y equipos necesarios para el ensamble del sistema solar fotovoltaico.

**Tabla 3.15.** Costos de los equipos e insumos del sistema solar fotovoltaico.

Cant.	Descripción	Valor (USD)	
		Unidad	Total
4	Panel solar SIMAX 150 W/12VDC	200,00	800,00
1	Controlador MORNINGSTAR TS 45	195,00	195,00
1	Inversor ZONHAM 1500W/12VDC	290,00	290,00
4	Baterías 6GFM100 100Ah/12Vdc	420,00	1680,00
1	Estructura de soporte para paneles solares	100,00	100,00
1	Gabinete	150,00	150,00
1	Material de conexión	75,00	75,00

En la Tabla 3.16 se describe los insumos y equipos que se necesitaron para la reconstrucción de la bomba de calor.

**Tabla 3.16.** Costos de los equipos e insumos de la bomba de calor.

Cant.	Descripción	Valor (USD)	
		Unidad	Total
1	Controlador de carga de 8 dígitos	65,00	65,00
4	Sensores de temperatura MT-512E 2HP	38,00	152,00
4	Manómetros de presión 1/2" NTP	18,00	72,00
1	Filtro secador 084 conexión NTP	18,00	18,00
2	Sueldas de Plata al 45%	19,50	39,00
4	Sueldas de Aluminio al 15%	5,80	23,20
4	Acoples de manómetros de 3/8" NTP	6,00	24,00
1	Accesorios para tubería 3/8" NTP	40,00	40,00
1	Contactor de 15 A - 110 V	25,00	25,00

Continuación Tabla 3.16

1	Breaker CHNT de 15A	20,00	20,00
1	Switch	8,00	8,00
10	Cable flexible #10-12 negro	2,50	25,00
1	Sistema de agua	20,00	20,00
1	Panel de control	70,00	70,00
1	Mano de obra	600,00	600,00

El costo del proyecto para poner en funcionamiento la bomba de calor y los equipos de laboratorio es de USD 3684, este valor fue dividido en dos partes iguales y solventado por dos grupos de tesis y el mejoramiento de la bomba de calor llego a un costo de USD 1201,20. Dando un total de USD 4886.

### 3.9.2. Costo tarifario de la empresa eléctrica Quito

El costo de la electricidad por cada  $kW \cdot h$  en el Distrito Metropolitano de Quito se describe en la Tabla 3.17.

**Tabla 3.17.** Pliego tarifario vigente a enero del 2016 [107].

Rango de consumo [ $kW \cdot h$ ]	Cargos tarifarios [UDS]	Descripción
Residencial		Se aplica a los consumidores sujetos a la categoría a Tarifa Residencial, independiente de la carga conectada. Por cada $kW \cdot h$ de consumo al mes.
0-50	0,0784	Por cada $kW \cdot h$
51-100	0,0814	Por cada uno de los siguientes 50 $kW \cdot h$
101-150	0,0834	Por cada uno de los siguientes 50 $kW \cdot h$
151-200	0,0904	Por cada uno de los siguientes 50 $kW \cdot h$
201-250	0,0974	Por cada uno de los siguientes 50 $kW \cdot h$
251-500	0,0994	Por cada uno de los siguientes 250 $kW \cdot h$

Continuación Tabla 3.17

501-700	0,1285	Por cada uno de los siguientes 200 $kW \cdot h$
701-1000	0,145	Por cada uno de los siguientes 300 $kW \cdot h$
1001-1500	0,1709	Por cada uno de los siguientes 500 $kW \cdot h$
1501-2500	0,2752	Por cada uno de los siguientes 1000 $kW \cdot h$
2501-3500	0,436	Por cada uno de los siguientes 1000 $kW \cdot h$
3501 y superior	0,6812	Por cada uno de los siguientes $kW \cdot h$

El consumo promedio de energía eléctrica de los hogares ecuatorianos en el área urbana es de 155  $kW \cdot h$ . El Distrito Metropolitana de Quito se encuentra ubicado en el cuarto puesto de las ciudades que más pagan por la energía eléctrica, con un promedio mensual de USD 18,52 [108].

En el pliego tarifario vigente se puede considerar que el promedio de consumo mensual de un hogar del DMQ se ubica en el rango de 151-200  $kW \cdot h$ , por lo cual, se asume que 1  $kW \cdot h$  tiene un costo de USD 0,0904.

Las pruebas realizadas a la bomba de calor duraban un promedio de 20 minutos, hasta llegar a la temperatura deseada. El compresor para su funcionamiento requiere 0,744  $kW$ . Entonces el costo de energía en el DMQ, por usar la bomba de calor al día es:

$$0,744 \text{ kW} \cdot 20 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 0,0904 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot h} = \text{USD } 0,02$$

Se concluye que el consumo eléctrico de la bomba de calor de 0,744  $kW$  durante 20 minutos en 1 mes tiene un valor de USD 13,7, este valor es por los rubros presentados en la planilla de consumo eléctrico mensual los cuales son mencionados en la Tabla 3.18.

**Tabla 3.18.** Planilla de consumo eléctrico mensual

Descripción	Cargos tarifarios
	[USD]
Consumo mensual	0,6
Comercialización	1,41

Continuación Tabla 3.18

Alumbrado público	2,43
Cuerpo de bomberos	1,88
Recolección de basura	7,38

La bomba de calor cuando se encuentre en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana debe trabajar durante 1 hora, el motivo es porque ingresan dos grupos de estudiantes y cada uno realiza varias prácticas en el lapso de 30 minutos. Es decir que el costo de usar la bomba de calor al mes es:

$$\frac{13,7 \text{ USD}}{14,88 \text{ kW} \cdot \text{h}} = 0,92 \frac{\text{USD}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$$

El consumo eléctrico de la bomba de calor por cada  $\text{kW} \cdot \text{h}$  es de USD 0,92. El dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico, no solo se centró en el encendido de la bomba de calor, también para los equipos que existe en los laboratorios de la universidad que de igual forma trabajan en un lapso de 1 hora. A continuación, en la Tabla 3.19 se describirán los equipos y el consumo energético mensual.

**Tabla 3.19.** Equipos del laboratorio

<b>Equipos</b>	<b>Potencia [kW]</b>	<b>Tiempo de funcionamiento [h]</b>	<b>Costo energético [kW·h]</b>
FM61 Reaction Turbine	0,37	1	0,37
FM42 Pelton Turbine	0,37	1	0,37
FM51 Series & Parallel Pumps	0,25	1	0,25
FM 50 Centrifugal Pump	0,25	1	0,25
		<b>Total</b>	<b>1,24</b>

El consumo mensual de energía eléctrica de los equipos de laboratorio es:

$$1,24 \text{ (kW} \cdot \text{h)} \cdot 0,92 \text{ (USD)} \cdot 4 \text{ semanas} = \text{UDS } 4,56$$

### 3.9.3. Análisis comparativos de costos

Se basa en la comparación de la energía generada por fuentes fósiles y la del sistema solar fotovoltaico. Como se muestra en la Tabla 3.20.

**Tabla 3.20.** Análisis comparativo de costos

Energía generada	Costo mensual [USD]
<b>Fuentes fósiles:</b>	
• Encendido de la bomba de calor por 20 minutos, durante un mes.	0,6
• Encendido de la bomba de calor por 1 hora, durante 20 días.	0,92
• Encendido de los equipos de laboratorio por 1 hora, durante 20 días.	4,56
<b>Sistema solar fotovoltaico</b>	
• Encendido de la bomba de calor por 20 minutos, durante un mes.	0
• Encendido de la bomba de calor por 1 hora, durante 20 días.	0
• Encendido de los equipos de laboratorio por 1 hora, durante 20 días.	0

Como se observa en la Tabla 3.20 con la instalación de un sistema solar fotovoltaico se tiene un costo mensual de USD 0, que resulta un beneficio para las familias del DMQ.



### 3.9.4. Estudio ambiental

La electricidad hoy en día representa un pilar importante en el desarrollo socioeconómico de los países. La producción de este elemento energético se basa en el derroche de recursos no renovables y renovables. Los combustibles fósiles son aquellos que producen mayor emisión de gases de efecto invernadero. A nivel mundial, el porcentaje de las emisiones de CO<sub>2</sub> se atribuyen a la electricidad y la generación de calor con el 41 %. En Ecuador el mayor valor que se registró de emisión de CO<sub>2</sub> fue de 0,3975 kg CO<sub>2</sub> por cada  $kW \cdot h$ . El valor más reciente, para el año 2014, es 0,3426 kg CO<sub>2</sub> por cada  $kW \cdot h$ . Este factor de emisión sirve para establecer indicadores de sustentabilidad, como la huella de carbono o la huella ecológica [109].

La huella ecológica (HE) es el área de territorio biológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesarios para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población determinada con un nivel de vida específico de forma indefinida, se dónde sea que se encuentre esa área [110].

La medición de la huella ecológica se realizó mediante la calculadora digital que se encuentra en el Ministerio del Ambiente [111], realizando el cálculo de la misma, resulta 0,21 hectáreas globales (hag), esto significa que con la implementación del sistema solar fotovoltaico este valor va a disminuir.

La bomba de calor consume 14,88  $kW \cdot h$  mensualmente, por lo cual para funcionamiento se produce emisiones de CO<sub>2</sub> las cuales son:

$$14,88 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \frac{0,34326 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kW} \cdot \text{h}} \cdot 12 \text{ meses} = 61,2925 \text{ kg CO}_2$$

También, los equipos de laboratorio consumen 1,24  $kW \cdot h$  mensualmente, entonces la producción anual de CO<sub>2</sub> va a ser:

$$1,24 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \frac{0,34326 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kW} \cdot \text{h}} \cdot 12 \text{ meses} = 5,1077 \text{ kg CO}_2$$

Las toneladas de  $CO_2$  que se puede dejar de emitir a la atmosfera con la implementación de un sistema solar fotovoltaico es de 0,0664 en este proyecto, pero a nivel de la industria o del sector residencial seria mayor la reducción de emisiones de  $CO_2$ .

### 3.9.5. Costo de mantenimiento

El costo de mantenimiento entra en vigencia cuando el sistema solar fotovoltaico esté instalado y puesto en funcionamiento, requiere de una revisión mensual en el sistema, para lo cual se requiere realizar un mantenimiento preventivo cada tres mensual, con un costo de USD 13,24; en el cual se incluirá:

- Limpieza de paneles
- Revisión del estado de cables
- Verificación de voltajes
- Limpieza del gabinete

### 3.9.6. Análisis financiero del proyecto

En la estimación de los indicadores de rentabilidad económica del proyecto se estableció el flujo neto incremental, considerando los costos económicos y los beneficios económicos a ser generados con la ejecución del proyecto [112].

Para la elaboración de la tabla para el ahorro económico de proyecto se requiere conocer la evolución del Índice de Precios al Consumidor (IPC). Por lo cual, la inflación anual más bajo se alcanzó en el 2007; para el 2015, llego a 4,87 % la inflación, de ahí fue disminuyendo hasta llegar a 1,59 % [113].

**Tabla 3.21.** Evolución de la inflación en el Ecuador [113].

2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
2,19%	9,69%	4,54%	3,30%	4,28%	5,00%	2,68%	3,67%	4,87%	1,59%

### 3.9.7. Ahorro económico

Se basa en los valores que no se van a destinar a la empresa eléctrica, adicional se va ayudar al medio ambiente con la disminución de las emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera de la tierra. En la Tabla 3.22 se mostrará todos los valores del ahorro económico.

**Tabla 3.22.** Proyección de ahorro.

Años	Inflación Anual [%]	Ahorro [USD] Eq. laboratorio	Ahorro [USD] Bomba de calor	Ahorro Anual [USD]	Gastos [USD]	Flujo Neto [USD]
1	2.19	17.66	13.70	384.56	3,486.00	-3,101.44
2	9.69	17.66	13.70	412.79	13.24	371.32
3	4.54	17.66	13.70	393.40	13.24	399.55
4	3.30	17.66	13.70	388.74	13.24	380.16
5	4.28	17.66	13.70	392.43	13.24	375.50
6	5.00	17.66	13.70	395.14	13.24	379.19
7	2.68	17.66	13.70	386.41	13.24	381.90
8	3.67	17.66	13.70	390.13	13.24	373.17
9	4.87	17.66	13.70	394.65	13.24	376.89
10	1.59	17.66	13.70	382.30	13.24	381.41

### 3.9.8. Cálculo del valor actual neto (V.A.N)

Es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de cajas futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual todo los cash-flows futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto [114]. Puede ser determinado mediante:

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+r)^n} \quad (37)$$

Donde:

$I$ : Inversión inicial

$n$ : Períodos

$N$ : Número de períodos

$Q_n$ : Flujos de dinero en cada período

$r$ : Tipo de interés exigido a la inversión

El VAN del proyecto es 0,02; lo que significa que la inversión no producirá ganancias ni pérdidas [114].

### 3.9.9. Cálculo de la tasa interna de retorno (T.I.R)

Este método considera que una inversión es aconsejable si la T.I.R resultante es igual o superior a la tasa exigida por el inversor, y entre varias alternativas, la más conveniente será aquella que ofrezca una T.I.R mayor [114]. Esta tasa de descuento hace que el V.A.N. sea igual a cero y se calcula con la siguiente formula.

$$VAN = 0 = \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1 + T.I.R)^n} - I \quad (38)$$

Donde:

$I$ : Inversión inicial

$n$ : Períodos

$N$ : Número de períodos

$Q_n$ : Flujos de dinero en cada período

$T.I.R$ : Tasa interna de retorno

En la Tabla 3.23 se muestran los cálculos de la T.I.R.

**Tabla 3.23.** Cálculos de la T.I.R.

Años	Flujo Neto [USD]	Flujo Acumulado [USD]
1	-3,101.44	-3101.44
2	371.32	-2730.12
3	399.55	-2330.57
4	380.16	-1950.41
5	375.50	-1574.91
6	379.19	-1195.72

Continuación Tabla 3.23

7	381.90	-813.82
8	373.17	-440.65
9	376.89	-63.76
10	381.41	317.65

---

La tasa interna de retorno (T.I.R) del proyecto es del 2%

### 3.9.10. Recuperación de la inversión

Es el número de años que la empresa tarda en recuperar la inversión. Este método selecciona aquellos proyectos cuyos beneficios permiten recuperar más rápidamente la inversión, es decir, cuanto más corto sea el periodo de recuperación de la inversión mejor será el proyecto [114].

$$PR = NA + \frac{|FA|}{F_{A+1}} \quad (39)$$

Donde:

$PR$  : Período de recuperación; [años]

$NA$  : Número de años donde se presentó flujo negativo; [años]

$FA$  : Flujo acumulado de  $NA$ ; [USD]

$F_{A+1}$  : Flujo acumulado siguiente a  $NA$ ; [USD]

Para encontrar la recuperación de la inversión se toma los datos de la Tabla 3.23.

$$PR = 9 + \frac{|-63,76|}{317,65} = 9,20 \text{ años}$$

Se concluye que el tiempo de recuperacion de la inversion es de 9 años y 2,4 meses.

## CONCLUSIONES

- Los conceptos fundamentales del sistema solar fotovoltaico autónomo, fueron analizados de varias fuentes de consulta, tales como; Balo et al. [50], Abella [98] y Pareja [94] los cuales proporcionaron teoría y métodos de cálculo para el sistema, además fue útil para adquirir nuevos conocimientos sobre los procesos y metodologías de energías renovables.
- El diseño del sistema solar fotovoltaico es capaz de generar  $1000 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{día}}$  para el funcionamiento del compresor de una bomba de calor hasta un 1 HP, también el sistema puede encender los equipos del laboratorio de la Universidad tales como; Reaction Turbine (FM 61), Pelton Turbine (FM 42), Series & Parallel Pumps (FM 51) y Centrifugal Pum (FM 50) y electrónicos de línea blanca como televisores, equipos de sonido, radios, hornos eléctricos entre otros.
- Las pruebas que se llevaron a cabo con el sistema solar fotovoltaico, se realizaron bajo diferentes condiciones climatológicas como días nublados, despejados y lluviosos con temperaturas de  $19 - 20 - 16$  °C respectivamente, también con una radiación de  $475, 38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  y ráfagas de viento de  $0 - 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , además se debe tener en cuenta que se realizaron pruebas en el mes de abril donde la radiación solar es muy crítica por las constantes lluvias que se precipitan en la zona.
- La implementación de un sistema de energía renovable en la actualidad es muy novedosa, ya que cuenta con un gran beneficio para el medio ambiente, en el proyecto se obtiene una reducción de 0,0664 toneladas de CO<sub>2</sub>, pero si se lo implementaría en la industria o en la zona residencial sería más grande la reducción de CO<sub>2</sub>. Además, el solo hecho de dejar de pagar por el consumo eléctrico es un punto a favor, donde se puede garantizar un ahorro completamente favorable al consumidor, ya que este tipo de sistema se dan para cualquier tipo de sector, donde las personas pagan por la instalación y el mantenimiento de los sistemas autónomos, más no por el consumo energético que utilizan.

- El diseño y la implementación del sistema solar fotovoltaico con una capacidad de  $35 \frac{kW \cdot h}{mes}$ , tuvo resultados exitosos en las diversas pruebas que se le realizaron al compresor de la bomba de calor y a otros equipos, además cuando existe las condiciones climatológicas óptimas el sistema de paneles fotovoltaicos funciona sin ningún problema, pero si las condiciones climatológicas cambian el funcionamiento disminuye y es probable que no pueda encender los equipos de forma directa, por eso es indispensable el banco de baterías para solucionar ese tipo de problemas.
- Las baterías que se ocupan en el sistema solar fotovoltaico tienen un voltaje máximo de 13,3 V y son de ciclo profundo, esto quiere decir que soportan cargas y descargas continuas por las aplicaciones que se pueden realizar con ellas. Las baterías estuvieron en constante funcionamiento debido a que se conectó varios equipos eléctricos de distintas potencias como un compresor, taladro, amoladora, licuadora, radio, caladora entre otros. Por eso los días de autonomía fueron claves para el funcionamiento adecuado del banco de baterías porque se cargaban en los 2 días que se calculó, sin importar las condiciones climatológicas.

## RECOMENDACIONES

- Tener en cuenta todos los factores externos que se puedan presentar cuando se avanza en el proyecto, como las dimensiones del lugar donde se va a instalar el sistema, la cantidad adicional de potencia que debe tener el sistema solar fotovoltaico por cualquier eventualidad.
- Para realizar el proceso de carga del refrigerante 134a al compresor se recomienda realizar este proceso a una temperatura entre 23 – 24 °C, para evitar el congelamiento del gas.
- Antes de poner en funcionamiento el sistema solar fotovoltaico se debe verificar que los paneles se encuentren en buen estado y conectados correctamente, además se debe realizar un reset en el controlador de cargar cuando es primera vez o se desconecte las baterías.



## REFERENCIAS

- [1] Programa Ambiental de las Naciones Unidas., «Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático,» Kioto, 1997.
- [2] L. Hui, C. Tin-Tai y J. Jie, «Building-integrated heat pipe photovoltaic/thermal system for use in Hong Kong,» *Solar Energy*, vol. 15, nº 5, p. 1084–1091, 2017.
- [3] C. Hongbing, Z. Lei y J. Pengfei, «Performance study of heat-pipe solar photovoltaic/thermal heat pump system,» *Applied Energy*, nº 190, pp. 960-980, 2017.
- [4] S. Poppi, N. Sommerfeldt y C. Bales, «Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 81, pp. 22-32, 2018.
- [5] M. Mohanra, Y. Belyayev y S. Jayaraj, «Research and developments on solar assisted compression heat pump systems – A comprehensive review (Part A: Modeling and modifications),» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 10, pp. 1-34, 2017.
- [6] B. Felten, J. Raasch y C. Weber, «Photovoltaics and Heat Pumps - Limitations of Local Pricing,» *Energy economics*, nº 7, p. 18, 2017.
- [7] M. Araz, A. Hepbasli y E. Biyik, «Performance evaluation of a building integrated photovoltaic (BIPV) system combined with a wastewater source heat pump (WWSHP) system,» *Energy Procedia*, nº 140, pp. 434-446, 2017.
- [8] I. Anwar Ibrahim, . T. Khatib y A. Mohamed, «Optimal sizing of a standalone photovoltaic system for remote housing electrification using numerical algorithm and improved system models,» *Energy*, nº 126, pp. 392-403, 2017.
- [9] L. Bilir y N. Yildirim, «Photovoltaic system assessment for a school building,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. XXX, pp. 1-13, 2017.
- [10] Y. Aoki, «Photovoltaic performance of Organic Photovoltaics for indoor energy harvester,» *Organic Electronics*, nº 17, 2017.

- [11] A. Aminu Dankaka y A. Gokhan, «Grid connected solar photovoltaic system as a tool for green-house gas emission reduction in Turkey,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 53, p. 1086–1091, 2016.
- [12] Y. Kuwano, «Progress of photovoltaic system for houses and buildings in Japan,» *Renewable Energy*, nº 15, pp. 535-540, 1998.
- [13] V. W. Tam, K. N. Le y X. Wang, «Regenerative practice of using photovoltaic solar systems for residential dwellings: An empirical study in Australia,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1-10, 2016.
- [14] L. Serrano-Luján, N. Espinoza y J. Abad, «The greenest decision on photovoltaic system allocation,» *Renewable Energy*, nº 101, pp. 1348-1356, 2017.
- [15] M. Ramos-Peralonso, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Madrid: Green Planet Environmental Consulting, 2014.
- [16] Ministerios de Coordinación de Sectores Estratégicos, «Balance energético 2016-Informe,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/04/BALANCE-ENERGETICO-2016-PARTE-1.pdf>.
- [17] C. E. Camargo Nogueira, J. Bedin, R. Krauss Niedzialkoski, S. N. Melegari de Souza y J. C. Munhoz das neves, «Performace of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 51, pp. 1610-1616, 2015.
- [18] International Energy Agency, «Solar Energy Perspectives: Executive Summary,» 3 Diciembre 2011.. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/Textbase/npsun/solar2011SUM.pdf>.
- [19] S. A. Kalogirou, «Photovoltaic Systems,» de *Solar Energy Engineering*, Academic Press, 2014, pp. 481-540.
- [20] P. Si, Y. Feng, Y. Lv, X. Rong, Y. Pan, X. Liu y J. Yan, «An optimization method applied to active solar energy systems for buildings in cold plateau areas – The case of Lhasa,» *Applied Energy*, nº 194, pp. 487-498, 2017.
- [21] Greenpeace España, «La energía solar puede dar electricidad limpia a más de 4.000 millones de personas para 203,» 1 Septiembre 2008. [En línea].

Available: <http://www.greenpeace.org/espana/es/news/2010/November/la-energ-a-solar-puede-dar-ele/>.

- [22] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, «La radiación solar,» 2016.
- [23] J. Zhang, L. Zhao, S. Deng, W. Xu y Y. Zhang, «A critical review of the models used to estimate solar radiation,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 70, pp. 314-329, 2017.
- [24] D. Yang, «Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks,» *Solar energy*, n° 136, pp. 288-302, 2016.
- [25] Eradiantes, «Efecto invernadero,» [En línea]. Available: <http://eradiantecs.j.blogspot.com/p/el-efecto-invernadero.html>.
- [26] H. Li, W. Ma, X. Wang y Y. Lian, «Estimating monthly average daily diffuse solar radiation with multiple predictors: A case study,» *Renewable Energy*, n° 36, pp. 1944-1948, 2011.
- [27] C. Feng, D. Li, S. Gao y K. Daniel, «Calculating the reflected radiation error between turbine blades and vanes based on double contour integral method,» *Infrared Physics & Technology*, n° 79, pp. 171-182, 2016.
- [28] Planet Astronomia, «Solsticios y Equinoccios,» [En línea]. Available: <https://imagenes.planetastronomia.com/2015/06/Solsticios-y-Equinoccios-e1434961984310.png>.
- [29] Corporación para la investigación energética , «Energía solar,» [En línea]. Available: <http://energia.org.ec/cie/energia-solar/>.
- [30] R. Santbergen, V. A. Muthukumar, R. M. Valckenborg, . W. van de Wall, A. Smets y M. Zeman, «Calculation of irradiance distribution on PV modules by combining sky and sensitivity maps,» *Solar Energy*, n° 150, pp. 49-54, 2017.
- [31] O. Perpiñán Lamigueiro, «Radiación Solar,» [En línea]. Available: <http://oscarperpinan.github.io/esf/RadiacionSolar.pdf>.
- [32] M. Raugei, S. Sgouridis, D. Murphy, V. Fthenakis y R. Frischknecht, «Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response,» *Energy Policy*, n° 102, pp. 377-384, 2017.

- [33] CONELEC, «Atlas solar del Ecuador,» [En línea]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>.
- [34] Meteonorm 7, «Irradiation data for every place on Earth,» [En línea]. Available: <http://www.meteonorm.com/>.
- [35] U. Pelay, . L. Luo, . Y. Fan, . D. Stitou y M. Rood, «Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 82-100, 2017.
- [36] A. Gila, . M. Medrano, . I. Martorell, . A. Lázaro, . P. Dolado, B. Zalba y L. F. Cabeza, «State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. XIV, pp. 31-55, 2010.
- [37] A. Frazzica y A. Freni, «Adsorbent working pairs for solar thermal energy storage in buildings,» *Renewable Energy*, n° 110, pp. 87-94, 2017.
- [38] B. Parida, S. Iniyan y R. Goic, «A review of solar photovoltaic technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 15, pp. 1625-1636, 2011.
- [39] P. G. Vasconcelos Sampaio y . M. . O. Aguirre González, «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,» *Renewable and sustainable energy reviews*, n° 74, pp. 590-601, 2017.
- [40] M. Alshayeb y . J. D. Chang, «Photovoltaic Energy Variations Due to Roofing Choice,» *Procedia Engineering* , n° 145, pp. 1104-1109, 2016.
- [41] REN21, «RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT,» 2015. [En línea]. Available: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf).
- [42] Sitiosolar, «Portal de energías renovables,» [En línea]. Available: <http://www.sitiosolar.com/historia-de-la-energia-solar-termica-parte-i/>.
- [43] C. Winterscheid, . J.-O. Dalenbäck y S. Holler, «Integration of solar thermal systems in existing district heating systems,» *Energy*, 2017.
- [44] H. . G. Bahraseman, E. M. Langur y . J. East, «Fast charging of thermal energy storage systems enabled by phase change materials mixed with expanded graphite,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n° 109, pp. 1052-1058, 2017.

- [45] Grabigosil. Lda, «Aquecimento Solar Térmico,» [En línea]. Available: <http://www.granigosil.com/servicos/solar-termico.html>.
- [46] energiza, «Historia de la energía solar fotovoltaica,» [En línea]. Available: <http://www.energiza.org/solar-fotovoltaica/22-solar-fotovoltaica/624-historia-de-la-energia-solar-fotovoltaica>.
- [47] C. Fritts, «On the Fritts selenium cell and batteries,» de *Van Nostrands Engineering Magazine*, 1885, pp. 388-395.
- [48] D. Chapin, . C. Fuller y G. Pearson, «A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power,» de *Journal of Applied Physics*, 1954, pp. 676-677.
- [49] Solenergy, «primer modulo solar,» [En línea]. Available: [https://solenergy.mx/assets/sabermas/primer\\_modulo\\_solar-413e74a20921a432cb25ff458fce4205ee51edd78641beebd7458762917ca254.png](https://solenergy.mx/assets/sabermas/primer_modulo_solar-413e74a20921a432cb25ff458fce4205ee51edd78641beebd7458762917ca254.png).
- [50] F. Balo y L. Sagbansua, «The selection of the best solar panel for the photovoltaic system design by using AHP,» *Science Direct*, nº 100, pp. 50-53, 2016.
- [51] Energy Informative, «Best Thin Film Solar Panels – Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS?,» [En línea]. Available: <http://energyinformative.org/best-thin-film-solar-panels-amorphous-cadmium-telluride-cigs/>.
- [52] L. Rocchetti y F. Beolchini, «Recovery of valuable materials from end-of-life thin-film photovoltaic panels: environmental impact assessment of different management options,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 89, pp. 59-64, 15 February 2015.
- [53] D. Johnston, «Functional requirements for component films in a solar thin-film photovoltaic/thermal pane,» *Solar Energy*, vol. 84, pp. 384-389, March 2010.
- [54] Energías Renovables, «energiasrenovablesinfo.com,» Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>.

- [55] . S. A. Tabatabaei, D. Formolo y J. Tr, «Analysis of performance degradation of domestic monocrystalline photovoltaic systems for a real-world case,» *Energy Procedia*, vol. 128, pp. 121-129, September 2017.
- [56] K. Moharram, A. Elhady, H. Kandil y E. Sherif, «Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling,» *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, pp. 869-877, December 2013.
- [57] L. Bilir y N. Yildirim, «Photovoltaic system assessment for a school building,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 17856-17868, 13 July 2017.
- [58] Satheesh Krishnamurthy OPEN University UK , «Aplicaciones de sistemas fotovoltaicos,» [En línea]. Available: [http://www.labri.fr/perso/billaud/Helios2/resources/es10/Chapter\\_10\\_ES.pdf](http://www.labri.fr/perso/billaud/Helios2/resources/es10/Chapter_10_ES.pdf).
- [59] Iasolar, «Funcionamientos de paneles,» [En línea]. Available: [http://www.iasolar.com/images/como\\_funcionan-paneles.jpg](http://www.iasolar.com/images/como_funcionan-paneles.jpg).
- [60] Amerescosolar, «solar-power-cathodic-protection,» [En línea]. Available: [www.amerescosolar.com/solar-power-cathodic-protection](http://www.amerescosolar.com/solar-power-cathodic-protection).
- [61] Wordpress, Apuntes de tecnología, Circuitos eléctricos, 2007.
- [62] IESO Camino Romano, Electricidad y circuitos eléctricos, 2005.
- [63] J. A. Arce Flores, «Tension, corriente y resistencia.,» de *Curso Electrónica Basica*, CIPET, 2001, pp. 1-12.
- [64] A. Huertas Montes, «Circuitos eléctricos,» de *Departamento de Tecnología*, I.E.S CÁSTULO, pp. 1-13.
- [65] C. E. Carbajal, «Resistencia Eléctrica,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/187439513/Resistencia-electrica-pdf>.
- [66] ID, «Resistencia Eléctrica,» [En línea]. Available: <http://roble.pntic.mec.es/jlop0164/archivos/resistencia.pdf>.
- [67] Foros de Electrónica, «Resistencias: Código de colores y valores posibles,» [En línea]. Available: [http://www.glentek.com/glentek/admin/documents/resistencias\\_codigos.pdf](http://www.glentek.com/glentek/admin/documents/resistencias_codigos.pdf).

- [68] Espacio honduras, [En línea]. Available: <http://www.espaciahonduras.net/voltaje-electrico>.
- [69] L. F. Cabeza, . A. Solé y C. Barreneche, «Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage,» *Renewable Energy*, vol. 110, pp. 3-39, 2017.
- [70] M. Boles y Y. Cengel, Termoninámica- sexta edición, México: McGRAW-HILL, 2008.
- [71] R. Donald y W. Kenneth, Termodinámica-sexta edición, México: McGRAW-HILL, 2001.
- [72] K. C. Rolle, TERMODINÁMICA- sexta edición, México : Pearson, 2006.
- [73] Universidad de Sevilla, «Refrigerantes,» [En línea]. Available: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/Apuntes/REFRIGERANTES2.pdf>.
- [74] Gas servel, «Ficha técnica R-134a,» [En línea]. Available: [https://www.gas-servei.com/images/Ficha\\_tecnica\\_R134A.pdf](https://www.gas-servei.com/images/Ficha_tecnica_R134A.pdf).
- [75] Linde, «R134a,» [En línea]. Available: [http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/R-134a316\\_85645.pdf?v=3.0](http://www.abellolinde.es/internet.lg.lg.esp/es/images/R-134a316_85645.pdf?v=3.0).
- [76] Pnuma, «Refrigerantes HCFC,» [En línea]. Available: [http://web2.unep.fr/hcfc/documents/documents/330\\_42.pdf](http://web2.unep.fr/hcfc/documents/documents/330_42.pdf).
- [77] United Nations Environment Programme, «The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer,» 2000.
- [78] H. Saeng, J.-I. Yoon y J.-D. Kim, «Characteristics of condensing and evaporating heat transfer using hydrocarbon refrigerants,» *Applied Thermal Engineering*, nº 26, pp. 1054-1062, 2006.
- [79] Danfoss, «Refrigeración y Aire acondicionado,» Danfoss engineering tomorrow, 2015. [En línea]. Available: <http://refrigerationandairconditioning.danfoss.mx/refrigerants/hydrocarbons/>. [Último acceso: 8 Mayo 2017].

- [80] M. Raja, «A comparative study on the performance of a R22 window air conditioner retrofitted with R407C/R290/R600a refrigerant mixture.,» *Ambient Energy*, vol. 29, pp. 207-17, 2008.
- [81] Y. Zhang, «Testing of the mixing refrigerants R152a/R125 in domestic refrigerator,» *Elsevier*, vol. 25, p. 169, 2005.
- [82] M. Fatouh, «Experimental evaluation of a domestic refrigerator working with LPG,» *Elsevier*, vol. 31, p. 1593, 2006.
- [83] K. Harby, «Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental,» *Elsevier*, vol. 12, p. 15, 2015.
- [84] J. Fernández Ferichola, «Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil,» *Proyectos Fin de carrera Universidad Carlos III*, p. 154, 2009.
- [85] Proyecto EnDev/GIZ, Manual de instalación de un sistema fotovoltaico domiciliario, Lima: Imaginart, 2013.
- [86] ITER, «Energía solar fotovoltaica,» de *Energías renovables*, 2011, pp. 1-8.
- [87] FOCER Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central, Manual sobre energía renovable. Solar fotovoltaica., San José, Costa Rica: BUN-CA, 2002.
- [88] Solarix, «MppSolar,» [En línea]. Available: <http://www.mpptsolar.com/es/regulador-de-carga-solar-mppt.html>.
- [89] B. Ghorbania, A. Behabadi, S. Ebrahimi y K. Vijayaraghavana, «Experimental investigation of condensation heat transfer of R600a/POE/CuO nano-refrigerant in flattened tubes,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 88, pp. 236-244, 2017.
- [90] J. Wang, J. Wang y J. . M. Li, «R134a condensation flow regime and pressure drop in horizontal microchannals cooled symmetrically and asymmetrically,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, pp. 1091-1102, 2017.
- [91] REFECOL, «Ficha Técnica,» [En línea]. Available: <http://www.refecol.com.ec/wp-content/uploads/2014/06/FichaTecnica-R134a.pdf>.



- [92] C. W. Orbea Paez y J. P. Vega Peñafiel, Diseño y construcción de una bomba de calor, Quito, 2008.
- [93] Tecumseh, «Reciprocating Compressors,» [En línea]. Available: <http://www.tecumseh.com/en/europe/Products/Reciprocating-Compressors/AED4456YXA?fromsearch=1>.
- [94] M. Pareja Aparicio, Energía Solar fotovoltaica, marcombo, 2009.
- [95] Arnau González y R. Riba, «Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system,» *Applied Energy*, n° 154, pp. 752-762, 2015.
- [96] C. Onyeka Okoye y O. Solyal, «Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings,» *Energy*, n° 126, pp. 573-584, 2017.
- [97] N. I. Abdul Azi y S. Irwan Sulaiman, «Optimal sizing of stand-alone photovoltaic system by minimizing the loss of power supply probability,» *Solar Energy*, n° 150, pp. 220-228, 2017.
- [98] M. A. Abella, Dimensionado de sistemas fotovoltaico, Madrid: CIEMAT, 2001.
- [99] Leonics, «How to design solar PV system,» [En línea]. Available: [http://www.leonics.com/support/article2\\_12j/articles2\\_12j\\_en.php](http://www.leonics.com/support/article2_12j/articles2_12j_en.php).
- [100] B. K. Jung, K. J. Chung, Y. H. An y J. S. Kang, «Design and commissioning of a TF coil power system using deep-cycle batteries for versatile experiment spherical torus,» *Fusion Engineering and Design*, n° 88, pp. 1597-1600, 2013.
- [101] G. B. Litjens, E. Worrell y W. G. Van Sark, «Assessment of forecasting methods on performance of photovoltaic-battery systems,» *Applied Energy*, vol. 221, pp. 358-373, 2018.
- [102] F-Chart Software, *EES: Engineering Equation Solver* /, 2015.
- [103] Ambient Weather, «ambient weather,» [En línea]. Available: <https://www.ambientweather.com/amws1200console.html>.
- [104] AEMC instruments, «Manual de instrucciones,» [En línea]. Available: <https://www.instrumart.com/assets/AEMC-CA879-manual.pdf>.
- [105] Fluke connect, «Cámara infrarroja Fluke Ti200,» [En línea]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/eces/termografia/fluke-ti200.htm?pid=77087>.

- [106] Full Gauge, «Controlador e indicador digital para temperaturas,» [En línea]. Available: <http://fullgauge.com/es/manual-del-producto-111>.
- [107] Empresa Electrica Quito, «Pliego tarifario,» [En línea]. Available: <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/143788/Pliego+Tarifario+En+ero+2016/414767b2-234d-4f10-a578-2c2990465c1f>.
- [108] INEC, «Información ambiental en hogares,» [En línea]. Available: [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Ambientales2012dic/Presentacion\\_Comparables\\_Practicas\\_Hogares.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Ambientales2012dic/Presentacion_Comparables_Practicas_Hogares.pdf).
- [109] R. Parra, «Factor de emisión de CO2 debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001-2014,» *Avances en ciencias e ingenierías*, vol. 7, n° 2, pp. 80-85, 2015.
- [110] Ministerio del Ambiente, «Boletín N° 1. Huella Ecológica del Ecuador,» Junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Boletin-Nro.-1.-Huella-Ecologica.pdf>.
- [111] Ministerio del Ambiente, «Calculadora de huella ecológica personal,» 4 junio 2013. [En línea]. Available: [http://huella-ecologica.ambiente.gob.ec/calculadora\\_personal.php](http://huella-ecologica.ambiente.gob.ec/calculadora_personal.php).
- [112] Yachay, «Análisis de la Factibilidad Económica y Financiera del Proyecto,» [En línea]. Available: <http://www.yachay.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/ESTUDIO-DE-FACTIBILIDAD-bn.pdf>.
- [113] El telegrafo , «La inflación anual es la más baja desde 2007,» [En línea]. Available: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/la-inflacion-anual-es-la-mas-baja-desde-2007>.
- [114] Apuntes DUOC, «Análisis económico,» [En línea]. Available: [http://apuntesduoc.pbworks.com/f/Valor\\_actual\\_netto.pdf](http://apuntesduoc.pbworks.com/f/Valor_actual_netto.pdf).

## ANEXOS

### Anexo 1. Imágenes termográficas

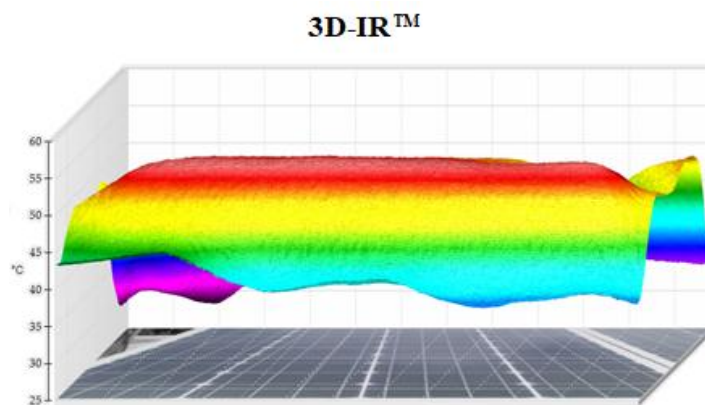
Estas tienen como finalidad mostrar el comportamiento de los paneles solares fotovoltaicos, condensador, evaporador y compresor de la bomba de calor en el instante de su funcionamiento, mediante imágenes que indican las diferentes temperaturas en las que se encuentran, también se aprecia el punto caliente, central, frío y los que se seleccionaron en las imágenes. Adicional se ubicaron Figuras reales de los equipos y Tablas que explican todos los parámetros que emite la cámara termográfica.

**Tabla A 1.1.** Información del panel solar fotovoltaico.

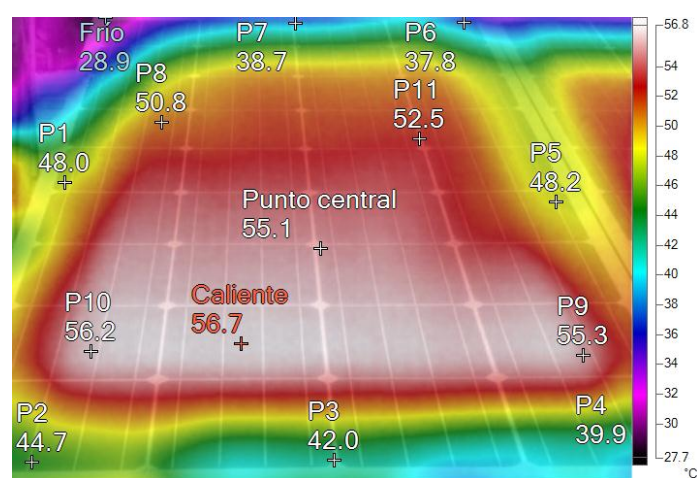
<b>Fecha de inspección</b>	24/04/2018 11:40:27	<b>Ubicación</b>	Pomasqui
<b>Equipo</b>	Panel solar fotovoltaico	<b>Número de panel</b>	1
<b>Emisividad</b>	0,94	<b>Temperatura reflejada</b>	19 °C
<b>Rango de la imagen</b>	28,9 °C a 56,7 °C	<b>Temperatura promedio</b>	49,7 °C
<b>Fabricante</b>	Fluke Thermography	<b>Modelo de cámara</b>	Ti200
<b>Rango de calibración</b>	-20 °C a 80 °C	<b>Distancia al objeto</b>	1,14 m



**Figura A 1.1.** Panel solar fotovoltaico N°1.



**Figura A 1.2.** Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°1.



**Figura A 1.3.** Imagen térmica del panel fotovoltaico N°1.

**Tabla A 1.2.** Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°1.

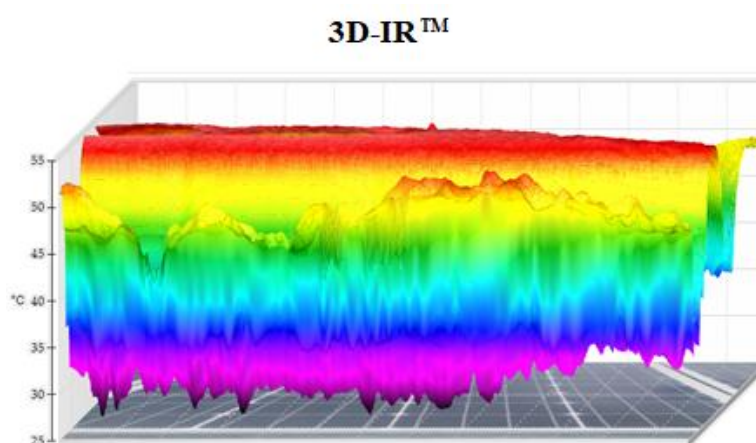
Descripción	Temperatura del Panel [°C]	Emisividad	Temperatura reflejada [°C]
Punto caliente	56,7	0,94	19
Punto frío	28,9	0,94	19
Punto centro	55,1	0,94	19
P1	48	0,94	19
P2	44,7	0,94	19
P3	42	0,94	19
P4	39,9	0,94	19
P5	48,2	0,94	19
P6	37,8	0,94	19
P7	38,7	0,94	19
P8	50,8	0,94	19
P9	55,3	0,94	19
P10	56,2	0,94	19

**Tabla A 1.3.** Información del panel solar fotovoltaico.

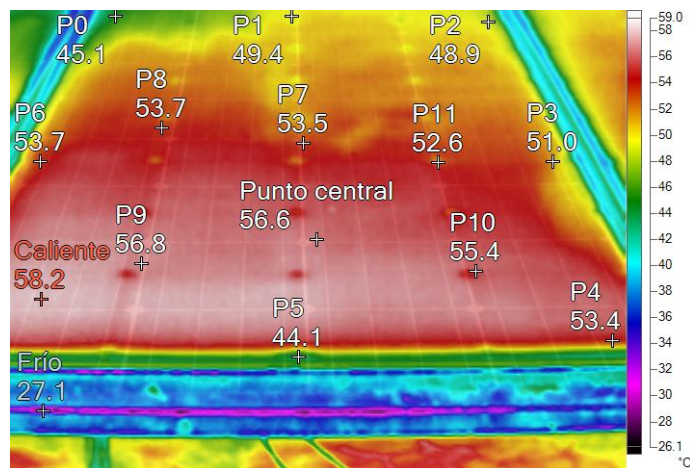
<b>Fecha de inspección</b>	24/04/2018 11:40:59	<b>Ubicación</b>	Pomasqui
<b>Equipo</b>	Panel solar fotovoltaico	<b>Número de panel</b>	2
<b>Emisividad</b>	0,94	<b>Temperatura reflejada</b>	19 °C
<b>Rango de la imagen</b>	27,1 °C a 58,2 °C	<b>Temperatura promedio</b>	50,3 °C
<b>Fabricante</b>	Fluke Thermography	<b>Modelo de cámara</b>	Ti200
<b>Rango de calibración</b>	-20 °C a 80 °C	<b>Distancia al objeto</b>	1,59 m



**Figura A 1.4.** Panel solar fotovoltaico N°2.



**Figura A 1.5.** Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°2.



**Figura A 1.6.** Imagen térmica del panel fotovoltaico N°2.

**Tabla A 1.4.** Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°2.

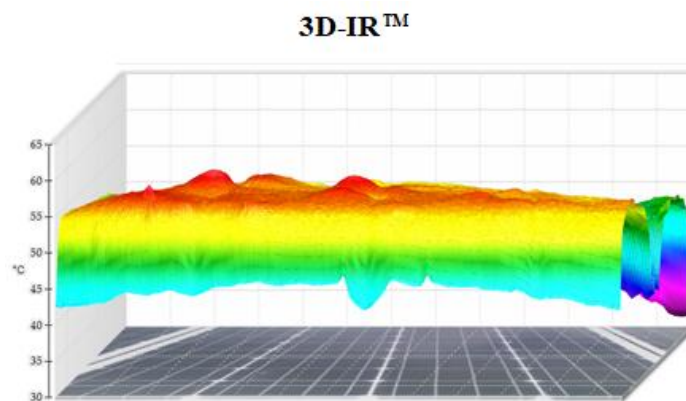
Descripción	Temperatura del Panel [°C]	Emisividad	Temperatura reflejada [°C]
Punto caliente	58,2	0,94	19
Punto frío	27,1,2	0,94	19
Punto centro	56,6	0,94	19
P0	45,1	0,94	19
P1	49,4	0,94	19
P2	48,9	0,94	19
P3	51	0,94	19
P4	53,4	0,94	19
P5	44,1	0,94	19
P6	53,7	0,94	19
P7	53,5	0,94	19
P8	53,7	0,94	19
P9	56,8	0,94	19
P10	55,4	0,94	19

**Tabla A 1.5.** Información del panel solar fotovoltaico.

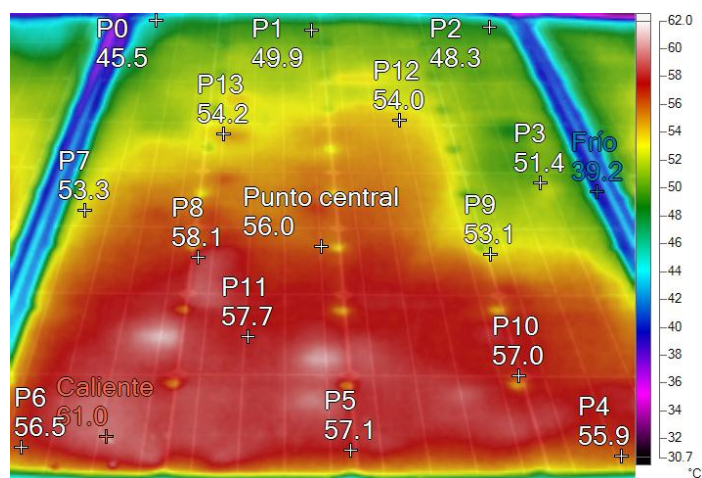
Fecha de inspección	24/04/2018 11:40:03	Ubicación	Pomasqui
Equipo	Panel solar fotovoltaico	Número de panel	3
Emisividad	0,94	Temperatura reflejada	19 °C
Rango de la imagen	32,2 °C a 61 °C	Temperatura promedio	53,6 °C
Fabricante	Fluke Thermography	Modelo de cámara	Ti200
Rango de calibración	-20 °C a 80 °C	Distancia al objeto	1,14 m



**Figura A 1.7.** Panel solar fotovoltaico N°3.



**Figura A 1.8.** Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°3.



**Figura A 1.9.** Imagen térmica del panel fotovoltaico N°3.



**Tabla A 1.6.** Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°3.

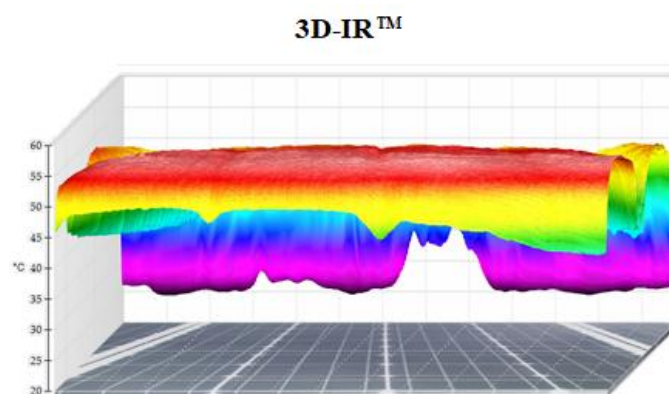
Descripción	Temperatura del Panel [°C]	Emisividad	Temperatura reflejada [°C]
Punto caliente	61	0,94	19
Punto frío	39,2	0,94	19
Punto centro	56	0,94	19
P0	45,5	0,94	19
P1	49,9	0,94	19
P2	48,3	0,94	19
P3	51,4	0,94	19
P4	59,9	0,94	19
P5	57,1	0,94	19
P6	56,5	0,94	19
P7	53,3	0,94	19
P8	58,1	0,94	19
P9	53,1	0,94	19
P10	57	0,94	19

**Tabla A 1.7.** Información del panel solar fotovoltaico.

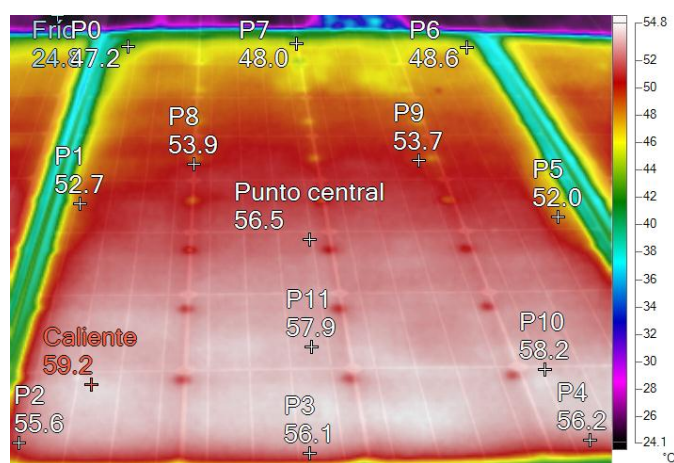
Fecha de inspección	24/04/2018 11:41:37	Ubicación	Pomasqui
Equipo	Panel solar fotovoltaico	Número de panel	4
Emisividad	0,94	Temperatura reflejada	19 °C
Rango de la imagen	24,8 °C a 59,2 °C	Temperatura promedio	53,1 °C
Fabricante	Fluke Thermography	Modelo de cámara	Ti200
Rango de calibración	-20 °C a 80 °C	Distancia al objeto	1,82 m

**Figura A 1.10.** Panel solar fotovoltaico N°4.





**Figura A 1.11.** Imagen térmica 3D del panel solar fotovoltaico N°4.



**Figura A 1.12.** Imagen térmica del panel fotovoltaico N°4.

**Tabla A 1.8.** Puntos específicos de la imagen térmica del panel fotovoltaico N°4.

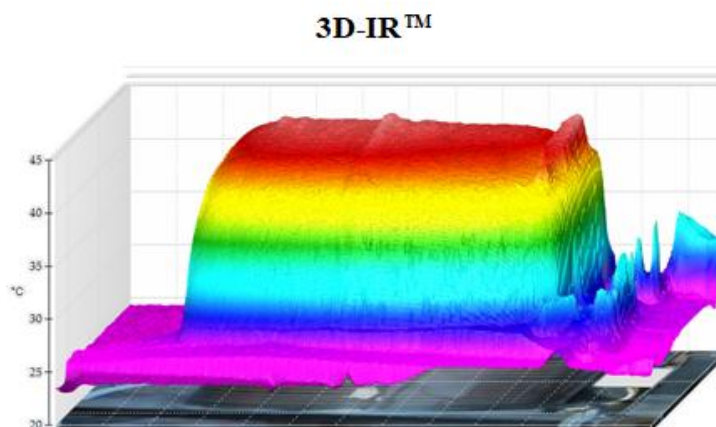
Descripción	Temperatura del Panel [°C]	Emisividad	Temperatura reflejada [°C]
Punto caliente	59,2	0,94	19
Punto frío	24,8	0,94	19
Punto centro	56,5	0,94	19
P0	47,2	0,94	19
P1	52,7	0,94	19
P2	55,6	0,94	19
P3	56,1	0,94	19
P4	56,2	0,94	19
P5	52	0,94	19
P6	48,6	0,94	19
P7	48	0,94	19
P8	53,9	0,94	19
P9	53,7	0,94	19
P10	58,2	0,94	19

**Tabla A 1.9.** Información del condensador.

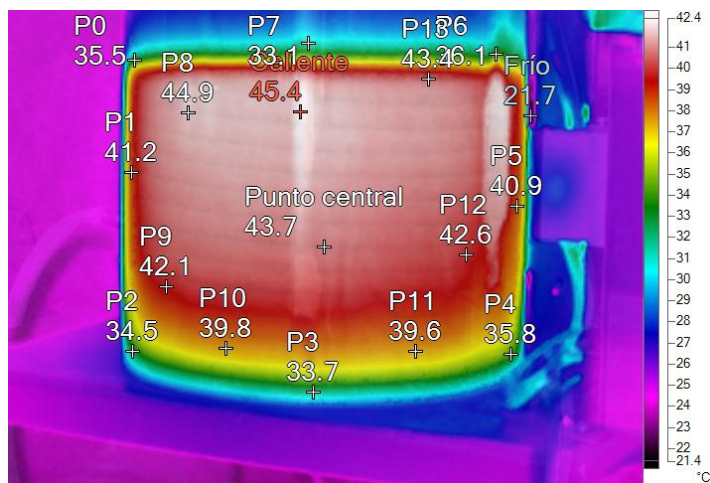
<b>Fecha de inspección</b>	24/04/2018 15:52:14	<b>Ubicación</b>	Pomasqui
<b>Equipo</b>	Bomba de calor	<b>Condensador</b>	1
<b>Emisividad</b>	0,94	<b>Temperatura reflejada</b>	19 °C
<b>Rango de la imagen</b>	21,7 °C a 45,4 °C	<b>Temperatura promedio</b>	33,6 °C
<b>Fabricante</b>	Fluke Thermography	<b>Modelo de cámara</b>	Ti200
<b>Rango de calibración</b>	-20 °C a 80 °C	<b>Distancia al objeto</b>	0,86 m



**Figura A 1.13.** Condensador.



**Figura A 1.14.** Imagen térmica 3D del condensador.



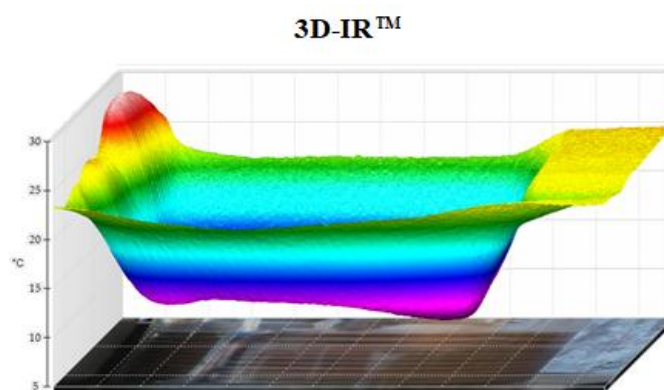
**Figura A 1.15.** Imagen térmica del condensador.

**Tabla A 1.10.** Puntos específicos de la imagen térmica del condensador.

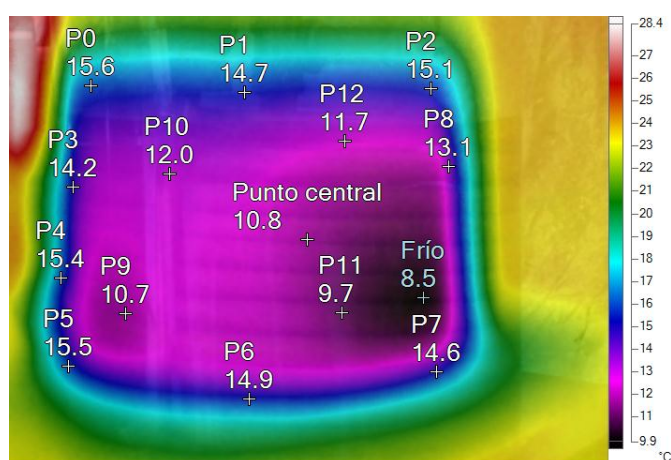
Descripción	Temperatura del Panel [°C]	Emisividad	Temperatura reflejada [°C]
Punto caliente	45,4	0,94	19
Punto frío	21,7	0,94	19
Punto centro	56,5	0,94	19
P0	35,5	0,94	19
P1	41,2	0,94	19
P2	34,5	0,94	19
P3	33,7	0,94	19
P4	35,8	0,94	19
P5	40,9	0,94	19
P6	36,1	0,94	19
P7	33,1	0,94	19
P8	44,9	0,94	19
P9	42,1	0,94	19
P10	39,8	0,94	19

**Tabla A 1.11.** Información del evaporador.

Fecha de inspección	24/04/2018 15:45:13	Ubicación	Pomasqui
Equipo	Bomba de calor	Evaporador	1
Emisividad	0,94	Temperatura reflejada	19 °C
Rango de la imagen	8,5 °C a 29,7 °C	Temperatura promedio	17,1 °C
Fabricante	Fluke Thermography	Modelo de cámara	Ti200
Rango de calibración	-20 °C a 80 °C	Distancia al objeto	0,00 m



**Figura A 1.16.** Imagen térmica 3D del evaporador.



**Figura A 1.17.** Imagen térmica del evaporador.

**Tabla A 1.12.** Puntos específicos de la imagen térmica del evaporador.

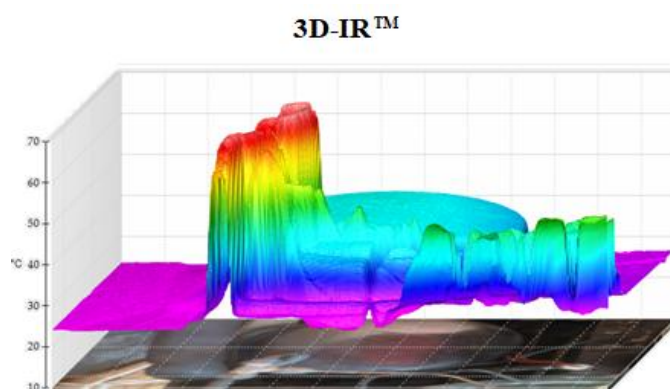
Descripción	Temperatura del Panel [°C]	Emisividad	Temperatura reflejada [°C]
Punto caliente	24	0,94	19
Punto frío	8,5	0,94	19
Punto centro	10,8	0,94	19
P0	15,6	0,94	19
P1	14,7	0,94	19
P2	15,1	0,94	19
P3	14,2	0,94	19
P4	15,4	0,94	19
P5	15,5	0,94	19
P6	14,9	0,94	19
P7	14,6	0,94	19
P8	13,1	0,94	19
P9	10,7	0,94	19
P10	12	0,94	19

**Tabla A 1.13.** Información del compresor y tubería.

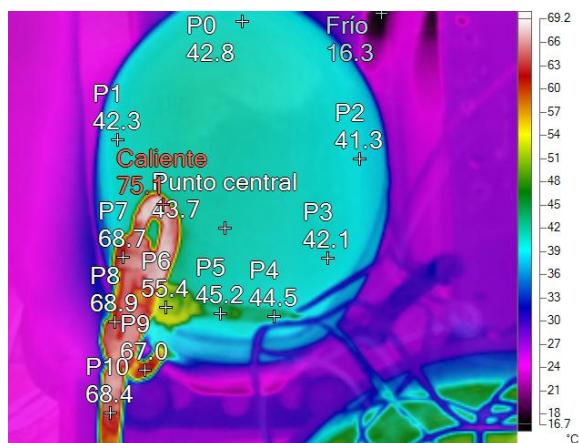
<b>Fecha de inspección</b>	24/04/2018 15:50:00	<b>Ubicación</b>	Pomasqui
<b>Equipo</b>	Bomba de calor	<b>Compresor</b>	1
<b>Emisividad</b>	0,94	<b>Temperatura reflejada</b>	19 °C
<b>Rango de la imagen</b>	16,3 °C a 75,1 °C	<b>Temperatura promedio</b>	34 °C
<b>Fabricante</b>	Fluke Thermography	<b>Modelo de cámara</b>	Ti200
<b>Rango de calibración</b>	-20 °C a 80 °C	<b>Distancia al objeto</b>	0,66 m



**Figura A 1.18.** Compresor y tubería.



**Figura A 1.19.** Imagen térmica 3D del compresor y tubería.



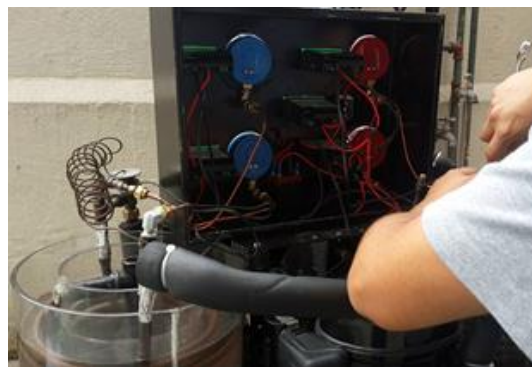
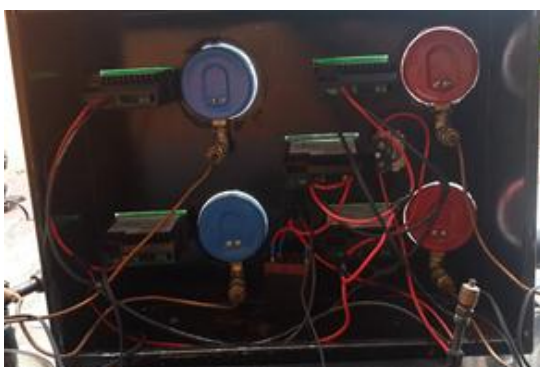
**Figura A 1.20.** Imagen térmica del compresor y tubería.

**Tabla A 1.14.** Puntos específicos de la imagen térmica del compresor y tubería.

<b>Descripción</b>	<b>Temperatura del Panel [°C]</b>	<b>Emisividad</b>	<b>Temperatura reflejada [°C]</b>
Punto caliente	75,1	0,94	19
Punto frío	16,3	0,94	19
Punto centro	43,7	0,94	19
P0	42,8	0,94	19
P1	42,3	0,94	19
P2	41,3	0,94	19
P3	42,1	0,94	19
P4	44,5	0,94	19
P5	45,2	0,94	19
P6	55,4	0,94	19
P7	68,7	0,94	19
P8	68,9	0,94	19
P9	67	0,94	19
P10	68,4	0,94	19



## Anexo 2. Proceso de mejoramiento de la bomba de calor





**Anexo 3.** Planos de la bomba de calor

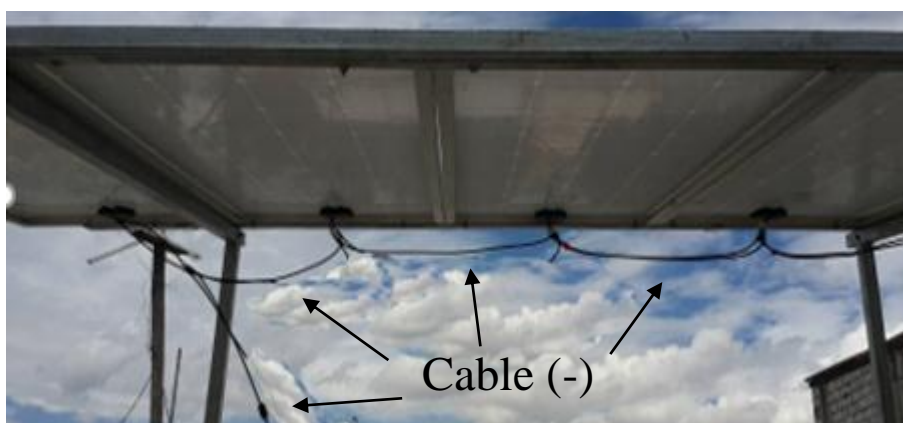


#### **Anexo 4.** Proceso de ensamble del sistema solar fotovoltaico

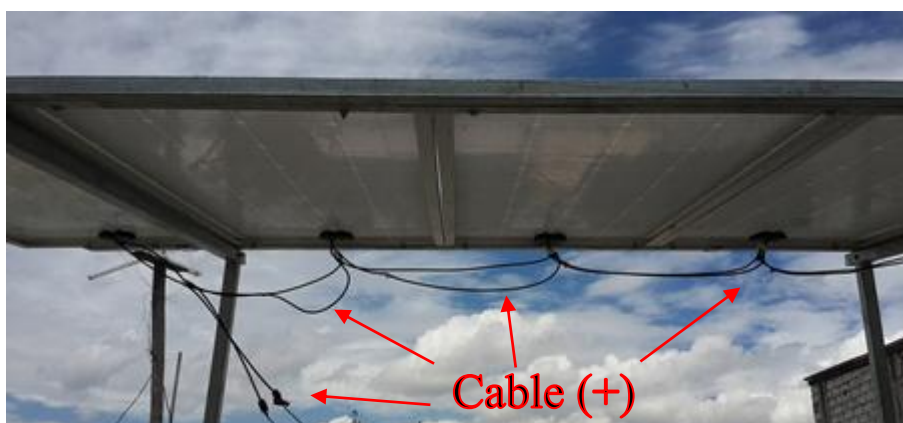
- Se arma la estructura metálica que van a estar anclados los paneles solares fotovoltaicos.



- La conexión de los 4 paneles solares fotovoltaicos es en paralelo y se debe conectar primero el Cable Negativo.



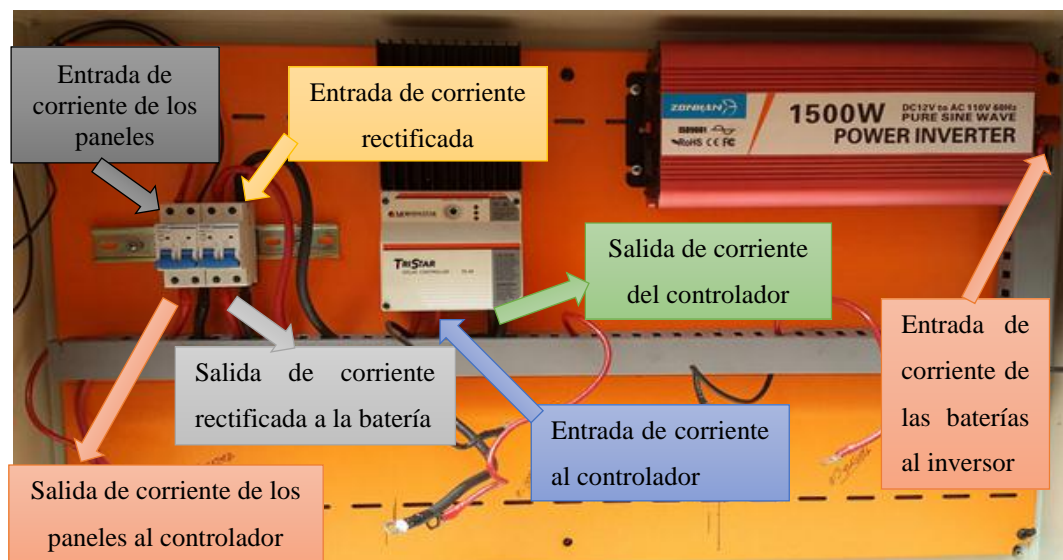
- Luego de conectar el cable negativo en paralelo, se procede de igual manera con el cable positivo.



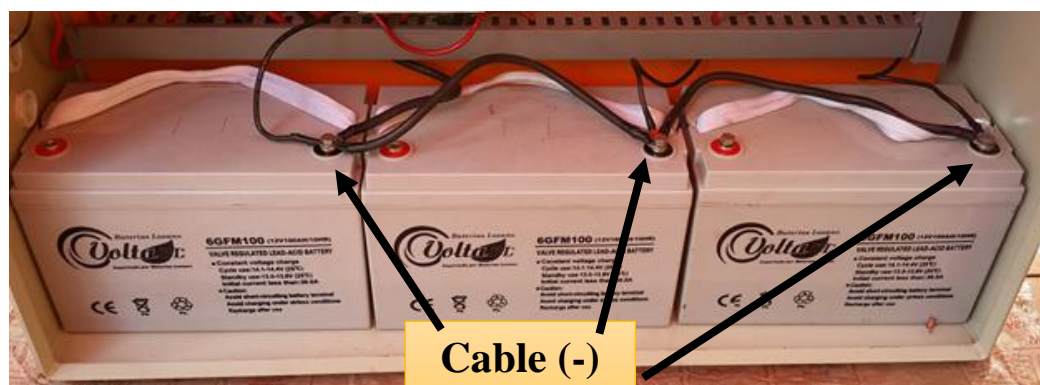
- Se instalan en el gabinete de conexiones los equipos para el funcionamiento del sistema solar fotovoltaico.



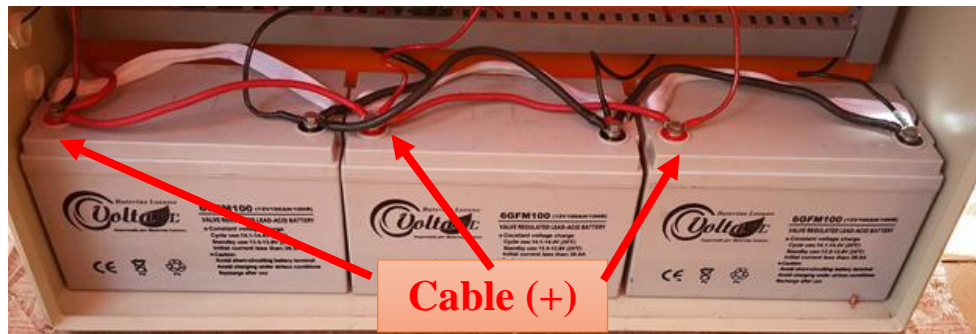
- Una vez instalado el breaker, el controlador y el inversor en el gabinete, se procede al pre cableado, teniendo en cuenta los polos positivos y negativos de cada uno de los equipos.



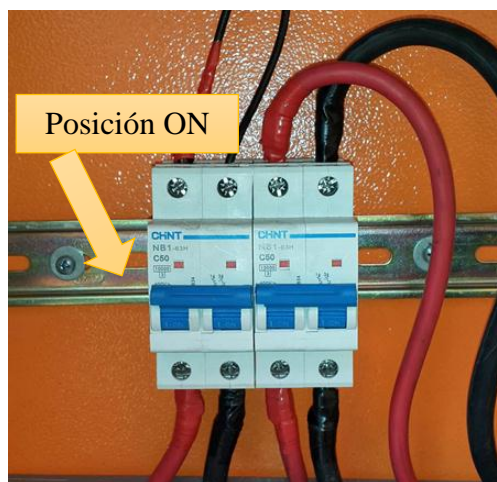
- Se coloca las baterías en la parte inferior del gabinete en orden, y luego se conecta de igual forma como los paneles en paralelo y primero el cable negativo.



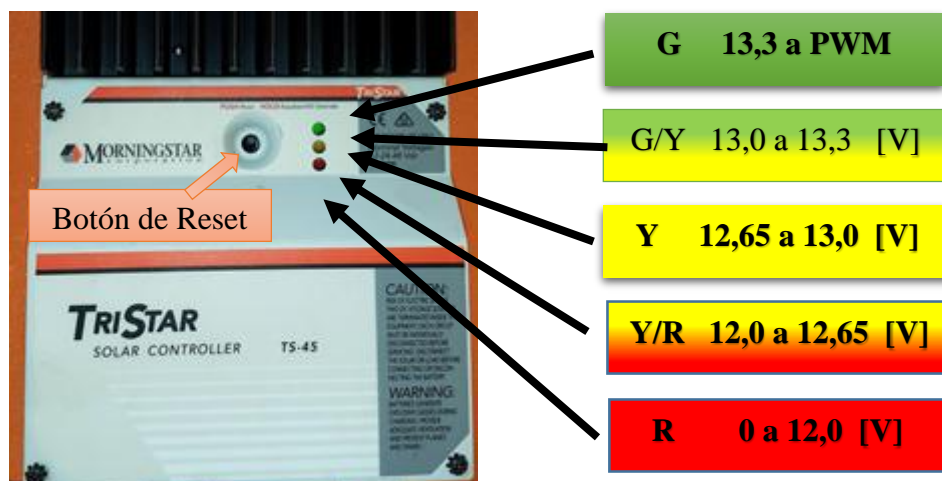
- Una vez conectado el polo negativo de las baterías, se procede a conectar el polo positivo en forma paralela.



- Una vez colocado y conectado todos los equipos en el gabinete, se procede a encender el sistema fotovoltaico ubicando los breakers en posición ON.

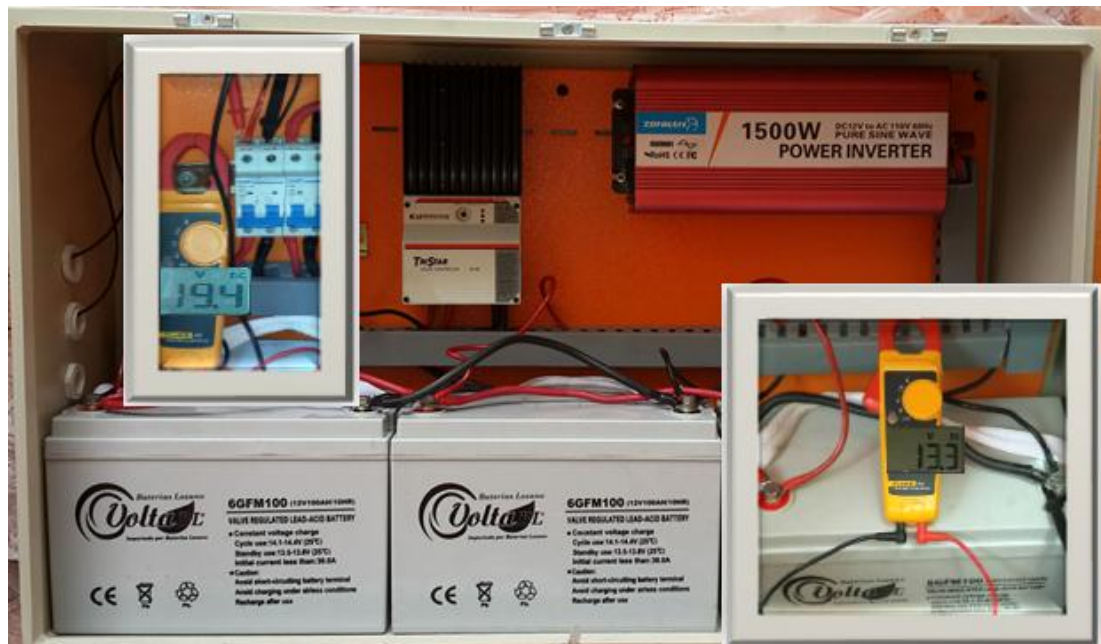


- Conectado el sistema fotovoltaico, se procede hacer el reset del controlador presionando el botón que se encuentra en la parte superior durante 5 segundos, el controlador titilará hasta detenerse en uno de los 3 colores que simbolizan el estado de carga de las baterías.





- Verificar la corriente de los paneles y de las baterías, que se encuentren en los valores óptimos para el encendido del inversor.



- Una vez realizado todo este procedimiento del sistema solar fotovoltaico se puede conectar la bomba de calor sin ningún inconveniente.



## Anexo 5. Manual de operación

- Inspeccionar que todo el sistema solar fotovoltaico esté conectado correctamente.



- Colocar los breakers en posición ON, para dar paso a la corriente de los paneles solares fotovoltaicos al controlador de carga y al banco de baterías.



- Comprobar que se encuentre de color verde el indicador del controlador de carga.



- Verificar que el banco de baterías cuente con un voltaje de 13,3 (V), para el funcionamiento correcto del sistema.



- Conectar el cable de energía la bomba de calor al inversor.



- Llenar los tanques de la bomba de calor con agua que este a temperatura ambiente y también verificar la presión de los manómetros se encuentren a 60 PSI en alta y 56 PSI en baja antes de su funcionamiento.



- Encender la bomba de calor, girando la perilla a la posición ON.



- Finalizada la práctica se debe apagar el equipo volviendo a la posición OFF la perilla y luego evacuar toda el agua de los tanques.

NOTA: Los controladores de temperatura digitales se encuentra calibrados con los parámetros que requiere trabajar la bomba de calor y se recomienda no manipular o modificar por personas no autorizadas.



## Anexo 6. Manual de mantenimiento

- Verificar el estado físico de paneles solares fotovoltaicos y su estructura.



- Limpiar con suavidad la superficie de los paneles solares fotovoltaicos, retirar los objetos que estén adheridos a ellos con agua y un limpiaparabrisas de goma.



- Los demás componentes del sistema solar fotovoltaico no necesitan un mantenimiento, tan solo una inspección mensual, porque cuentan con un tiempo de vida útil y cuando esta llega a su final solo se deben remplazar.
- Verificar que la bomba de calor que esté totalmente apagada.





- Se conecta la bomba de vacío o unidad recuperadora de refrigerante al tubo de descarga del compresor para retirar el gas de todo el sistema.



- Una vez desalojado el gas del sistema se procede a cambiar el filtro, los aislantes térmicos y a revisar que no existan fisuras en las tuberías.
- Realizados todos los cambios antes mencionados se procede a carga el gas (refrigerantes 134a) en el sistema con una bombona y una balanza digital que ayuda a verificar cuanto gas ingresa al compresor. Se cargó 600 gr de refrigerante 134a para el funcionamiento de la bomba de calor.



- Se realiza una verificación de fugas en el sistema con una solución jabonosa y una esponja en todas las uniones.
- Si se realizó todos los pasos de mantenimiento correctamente la bomba de calor debe trabajar en condiciones óptimas.

## MANTENIMIENTO BÁSICO

Limpieza	
Cambio	
Revisión	

Items	SEMANAS																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Paneles																										
Tanques de agua																										
Gabinete																										
Bancos de baterías																										
Estructura																										
Agua de los recipientes																										
Cables																										
Presión de alta																										
Presión de baja																										

Items																																																				
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52																										
Paneles																																																				
Tanques de agua																																																				
Gabinete																																																				
Bancos de baterías																																																				
Estructura																																																				
Agua de los recipientes																																																				
Cables																																																				
Presión de alta																																																				
Presión de baja																																																				